„СВ. КИРИЛ И МЕТОДИЈ" — СКОПЈЕ

ПРОФ. Д-Р ТОМИСЛАВ ЏЕКОВ

МИКРОЕЛЕКТРОНИКА

УНИВЕРЗИТЕТ „СВ. КИРИЛ И МЕТОДИЈ" - СКОПЈЕ

ПРОФ. Д-Р ТОМИСЛАВ ЏЕКОВ

МИКРОЕЛЕКТРОНИКА

Скопје 1993

Одобрено со решение на Универзитетот во Скопје како учебник, II издание

Рецензенти

Проф. д-р Петар Биљановиќ
Проф. Милчо Коцаре

Лектура

Оливера Павловска

Умножено на офсет техника во Универзитетската печаница - Скопје
Тираж 300 примероци

П Р Е Д Г О В О Р

Овој текст е напишан врз основа на предавањата што сум ги држел во периодот од учебната 1982/83 до учебната 1984/85 година на насоката за електроника и телекомуникации на Електротехничкиот факултет во Скопје, а е во согласност со наставната програма на дисциплината.

Материјалот е поделен на пет глави.

Глава 1 претставува воведен дел во кој се прецизираат местото и значењето на интегралните кола во современата електроника, се осветлува нивната технолошка суштина и се даваат основните правци на нивниот развој.

Во глава 2 се разгледуваат основните технолошки постапки потребни за реализација на монолитните интегрални кола. Нејзиниот обем не дозволува подлабоко навлегување во оваа важна проблематика, но сепак постои доволно материјал за да се добие задоволителен одговор на прашањето за начинот на реализацијата на најзначајниот производ на микроелектрониката - монолитното интегрално коло.

Глава 3 навлегува во анализата на основните структури на монолитните интегрални кола, т.е. на pn-спојот и структурата метал-изолатор-полупроводник. Приодот е поопшт и потемелен, а истовремено и повеќе приспособен кон практичката примена отколку оној што обично се среќава во наставната дисциплина електронски елементи. За да се олесни следењето и совладувањето на материјалот на оваа инаку "најматематичка" глава, дадени се поголем број практични примери (решени проблеми).

Предмет на обработка на глава 4 се биполарните и MOS-униполарните интегрални елементи. Во интерес на едноставноста, јасноста и исцрпноста на изложувањето, разгледани се само т.н. класични или стандардни изведби, т.е. оние што подолго време имале доминантно место во практиката.

Глава 5 е посветена на хибридните интегрални кола. Интересот е сконцентриран, главно, на слојните елементи, но одреден простор е отстапен и на чип-компонентите. Со еднакво внимание се третирани двата развојни правца во оваа област, т.е. дебелослојната и тенкослојната техника.

Наставниците, за разлика од другите автори, се во позиција да го контролираат квалитетот на своите текстови уште при самото пишување. Во овој поглед од особено значење се часовите на предавањата на кои, преку интересот и реагирањата на студентите, наставникот може да добие определен суд за квалитетот на својот напишан материјал. Освен тоа, големи можности за проверка на ефикасноста на одредена концепција, односно на успешноста на одредена презентација дава и соработката со студентите при формирањето на нивните дипломски и семинарски работи. Во оваа пригода сакам да им се заблагодарам на сите мои дипломци кои на посреден или непосредн начин помогнале во формирањето на овој материјал.

Со задоволство ќе ги примам сите сугестии и предлози во врска со подобрувањето на кој и да било дел од материјалот или на неговата организација во целина.

Томислав Џеков

С О Д Р Ж И Н А

1. ВОВЕД 1

1.1. Поим и класификација на интегралните кола 1

1.2. Основни карактеристики на монолитните интегрални кола 3

1.3. Технологија и основни принципи на фабрикацијата на монолитните интегрални кола 5

1.4. Хибридни интегрални кола 7

2. ОСНОВНИ ТЕХНОЛОШКИ ПОСТАПКИ ВО ФАБРИКАЦИЈАТА НА МОНОЛИТНИТЕ ИНТЕГРАЛНИ КОЛА 10

2.1. Изготвување на монокристалната силициумска плочка 10

2.2. Епитаксија 11

2.3. Термичка оксидација 13

2.4. Дифузија на примеси 17

2.5. Метализација 24

2.6. Фотолитографија 27

2.7. Постапка на добивање на фотошаблонот 30

2.8. Јонска имплантација 32

2.9. Хемиско напарување 35

2.10. Основни чекори при реализацијата на монолитните интегрални кола 36

3. ОДБРАНИ ПОГЛАВЈА ОД ФИЗИЧКИТЕ ОСНОВИ НА МИКРОЕЛЕКТРОНИКАТА 40

3.1. Теориски основи на дифузијата 40

3.1.1. Фикови закони 40

3.1.2. Дифузија од неограничен извор 41

3.1.3. Дифузија од ограничен извор 44

3.1.4. Двочекорна дифузија 47

3.1.5. Дифузија при временски променлив дифузен коефициент 53

3.1.6. Положба на емитерскиот и колекторскиот pn-спој кај npn-транзисторот 57

3.1.7. Слојна отпорност 59

3.2. Анализа на преодното подрачје на pn-спојот 66

3.2.1. Апроксимација на испразнето подрачје 66

3.2.2. pn-спој сс произволен pn-премин 67

3.2.3. pn-споеви со скокообразен, односно со линеарен pn-премин 71

3.2.4. Лоренс-Ворнерови криви 79

3.2.5. Нумеричко одредување на дебелината, специфичната капацитивност и максималното електрично поле на преодното подрачје кај pn-спој со произволен примесен профил 83

3.2.6. Пробивен напон кај pn-спојот 84

3.3. MOS-структури 86

3.3.1. Основни релации кај MOS-структурите 86

3.3.2. Ефект на разликата на работните функции на металот и полупроводникот 91

3.3.3. Ефект на површинскиот полнеж 94

3.3.4. Подрачја на работа на MOS-структурата 94

3.3.5. Праговен напон кај MOS-структурите 101

3.4. Факторот β кај интегралните npn-транзистори 105

3.4.1. Воведни забелешки 105

3.4.2. Транспортни равенки на споредните носители во базата и емитерот на npn-транзисторот 109

3.4.3. Израз за факторот β 112

3.4.4. Приближно одредување на Гамеловиот број на базата 116

4. ЕЛЕМЕНТИ НА МОНОЛИТНИТЕ ИНТЕГРАЛНИ КОЛА 120

4.1. Некои општи карактеристики на елементите на монолитните интегрални кола 120

4.2. Основна разлика меѓу структурата на биполарните и структурата на MOS-интегралните кола 122

4.3. Елементи на биполарните интегрални кола 125

4.3.1. Потколекторски слој 125

4.3.2. npn-транзистори 127

4.3.3. pnp-транзистори 132

4.3.4. Монолитни диоди 135

4.3.5. Монолитни отпорници 137

4.3.6. Монолитни кондензатори 146

4.4. MOS-интегрални кола 154

4.4.1. MOS-транзистори 158

4.4.2. Примена на јонската имплантација во MOS-интегралната технологија 170

4.4.3. Структури со комплементарни MOS-транзистори 172

4.5. Основни елементи од топологијата на монолитните интегрални кола 177

5. ХИБРИДНИ ИНТЕГРАЛНИ КОЛА 180

5.1. Класификација и карактеристики на хибридните интегрални кола 180

5.2. Слојни кола - основни принципи на нанесување на филмовите и карактеристики 181

5.3. Елементи на слојните кола 185

5.3.1. Проводни патеки 185

5.3.2. Слојни отпорници 186

5.3.3. Слојни кондензатори 195

5.3.4. Вкрстувања кај слојните кола 200

5.4. Нанесување филмови во дебелослојната техника 200

5.5. Основни материјали за формирање на дебелослојните кола 203

5.5.1. Подлога 203

5.5.2. Проводнички пасти 204

5.5.3. Отпорнички пасти 204

5.5.4. Диелектрички пасти 205

5.6. Фабрикациона секвенца кај дебелослојните кола . 207

5.7. Формирање филмови во тенкослојната техника 208

5.7.1. Термичко напарување 208

5.7.2. Катодно распрашување 209

5.7.3. Електрохемиско нанесување 211

5.7.4. Анодизација 211

5.8. Основни материјали за формирање на тенкослојните кола 212

5.8.1. Подлога 212
5.8.2. Проводнички филмови 213
5.8.3. Отпорнички филмови 214
5.8.4. Диелектрички материјали 215
5.9. Изготвување на тенкослојните кола 217
5.10. Чип-компоненти 221
5.10.1. Активни чип-компоненти 222
5.10.2. Пасивни чип-компоненти 228

Прилог I. Некои својства на функциите erf(z) и erfc(z) 230

Прилог II. Таблица на вредности на функцијата erfc(z) 231

Прилог III. Некои својства на силициумот 232

Прилог IV. Физички константи што се користат во микроелектрониката 233

Список на литература 234

1. ВОВЕД

Микроелектрониката е гранка на електрониката и електроничката технологија која се занимава со минијатуризација на електронските елементи, склопови и системи. Предмет на нејзиното проучување се интегралните кола, т.е. нивната фабрикација, структура, карактеристики и начини на примена.

Минијатуризацијата, како тенденција во современата електроника, не треба да се сфати како цел самата на себе туку како средство кое доведува и до други, можеби и многу поважни ефекти. Имено, таа резултира во зголемување на квалитетот и надежноста на електронската опрема при истовремено намалување на потрошувачката на моќност и на цената на производството.

1.1. Поим и класификација на интегралните кола[1,2]

Под поимот интегрално коло подразбираме множество од меѓусебно сврзани елементи (транзистори, диоди, кондензатори, отпорници и т.н.) кое е изготвено во еден единствен технолошки циклус, на една единствена носечка конструкција - подлога - и со кое се реализира определена функција. Терминот интегрално коло го одразува фактот дека се работи за коло добиено со обединување на повеќе елементи во една единствена конструктивна целост, како и фактот дека функцијата на таквата целина е посложена отколку функцијата на одделните елементи.

Интегралните кола претставуваат основа на современата електроника и се јавуваат како трета компонентна база во историјата на развојот на електрониката (првата се електронските ламби, а втората - транзисторите). Нивните предности во однос на транзисторите се истите оние со кои транзисторите се одликуваат во однос на електронските ламби, т.е. тие имаат поголема

надежност, помала зафатнина и тежина, помала потрошувачка на моќност и помала цена. Многу од современите електронски системи, особено оние со голем број елементи, какви што се компјутерите (бројот на елементите на еден современ компјутер е од редот на 10^8), не би можеле воопшто да бидат реализирани без примена на интегралните кола.

Според начинот на изготвувањето и структурата, интегралните кола се делат на монолитни и хибридни. Кај монолитните интегрални кола елементите се реализираат во површинскиот слој на дадена полупроводничка подлога (силициум) со помош на селективна дифузија на донорски, односно акцепторски примеси. За хибридните интегрални кола е карактеристично тоа што кај нив најнапред се реализираат пасивните елементи (проводниците, отпорниците и кондензаторите) врз површината на дадена диелектрична подлога (стакло, керамика) со помош на селективно нанесување филмови од различни материјали (проводнички, отпорнички и изолаторски), а потоа се додаваат активните елементи (транзисторите, диодите) во вид на соодветни чипови. Монолитната технологија не овозможува реализација на индуктивни елементи, па монолитните интегрални кола се кола без калеми и трансформатори. Кај хибридните интегрални кола ги среќаваме, меѓутоа, практично сите познати електронски елементи, што е разбирливо ако се има предвид дека сѐто она што не може да се реализира во слојна техника секогаш може да се придодаде како дискретен елемент.

Според природата на основниот елемент, монолитните интегрални кола се делат на биполарни и униполарни. Кај биполарните интегрални кола основен елемент е npn-транзисторот, а како споредни елементи се јавуваат диодата, отпорникот, кондензаторот, pnp-транзисторот и спојните униполарни транзистори. Кај униполарните интегрални кола како основни елементи се јавуваат MOS-транзисторите со индуциран канал, така што, всушност, станува збор за MOS-интегрални кола. Ако главниот елемент е n-канален MOS-транзистор, зборуваме за NMOS-кола, а ако е p-канален MOS-транзистор, зборуваме за PMOS-кола. За разлика од биполарните интегрални кола, кај униполарните интегрални кола основниот елемент е фактички и единствен елемент. Имено, кај нив отпорниците се реализираат со MOS-транзистори врзани како двокрајници, а улогата на кондензатори ја вршат капацитивностите

од типот гејт-канал. Понекогаш, меѓутоа, покрај MOS-транзисторите со индуциран канал, се употребуваат и соодветни MOS-транзистори со вграден канал. Освен NMOS и PMOS-колата, постои уште една, денес мошне значајна, варијанта на униполарни интегрални кола, а тоа се CMOS-колата. Тие се карактеризираат со основен елемент кој претставува пар од n-канален и p-канален MOS-транзистор.

Слично, според природата и начинот на нанесувањето на филмовите со кои се реализираат пасивните елементи, хибридните интегрални кола се делат на тенкослојни и дебелослојни.

Столб на современата електроника и нејзин најистакнат елементарен производ се монолитните интегрални кола.

1.2. Основни карактеристики на монолитните интегрални кола[1,2]

Силниот пробив на монолитните интегрални кола во електрониката, почнувајќи од почетокот на шеесеттите години па до денес, е резултат на повеќе нивни предности во однос на дискретните полупроводнички компоненти.

Монолитните интегрални кола се одликуваат со далеку поголема надежност од колата изведени со дискретни компоненти. Имено, нивната надежност - и тогаш кога содржат десетици илјади елементи - е мерлива со надежноста на една единствена дискретна компонента.

Општо позната карактеристика на монолитните интегрални кола е големата густина на пакување, која денес достига и преку илјада елементи на квадратен милиметар. Благодарение на неа, цели склопови па и системи - вградени во рамките на едно интегрално коло - имаат иста или приближно иста зафатнина и тежина со една единствена дискретна компонента.

Важна карактеристика на монолитните интегрални кола е малата потрошувачка на моќност. Додека потрошувачката на моќност кај големите системи базирани врз интегрална техника, какви што се современите компјутери, е од ред на големина на десетина или стотина вати, истите тие системи, кога би биле

изградени во дискретна техника,[1/] би имале дисипација од ред на големина на стотици киловати, па дури и мегавати.

Конечно, ниската цена е уште една особина која не е помалку значајна од претходно наведените. Имено, цената на комплексните стандардни интегрални кола, каков што е, на пример, микропроцесорот, е споредлива со цената на дискретните компоненти. Токму тоа го овозможи пробивањето на компјутеризацијата во сите области на човековата дејност, вклучувајќи ја и појавата на личните компјутери што денес се произведуваат во милиони примероци годишно.

Димензиите на чиповите кај современите монолитни интегрални кола се движат во границите од 1,5 x 1,5 mm^2 до 6 x 6 mm^2. Во принцип, чиповите со поголема плоштина одговараат на покомплексни е интегрални кола. Меѓутоа, сложеноста на интегралните кола во голема мерка зависи и од густината на пакувањето, т.е. од димензиите на елементите и од растојанието меѓу нив.

Според бројот на елементите, монолитните интегрални кола се класифицираат во следниве четири групи:

- кола со мал степен на интеграција или SSI-кола. Кај нив бројот на елементите е помал од 100;
- кола со среден степен на интеграција или MSI-кола. Во оваа група спаѓаат интегралните кола чиј број на елементите е меѓу 100 и 1000;
- кола со голем степен на интеграција или LSI-кола. Во оваа група спаѓаат интегралните кола чиј број на елементите е меѓу 1000 и 10000;
- кола со многу голем степен на интеграција или VLSI-кола. Кај нив бројот на елементите е поголем од 10000.

Биполарните интегрални кола имаат широка примена и во дигиталната и во аналогната техника, додека примената на униполарните интегрални кола е ориентирана, главно, кон дигиталната техника. Биполарните интегрални кола доминираат меѓу колата со мал и среден степен на интеграција, додека униполарните интегрални кола меѓу колата со голем и многу голем степен на интеграција.

1/ Оваа претпоставка е само фиктивна бидејќи, поради малата надежност, ваквите системи не би биле работоспособни.

1.3. Технологија и основни принципи на фабрикацијата на монолитните интегрални кола[1,2]

Темели на фабрикацијата на монолитните интегрални кола се планарната технологија врз силициум, принципот на групно процесирање и принципот на основен елемент.

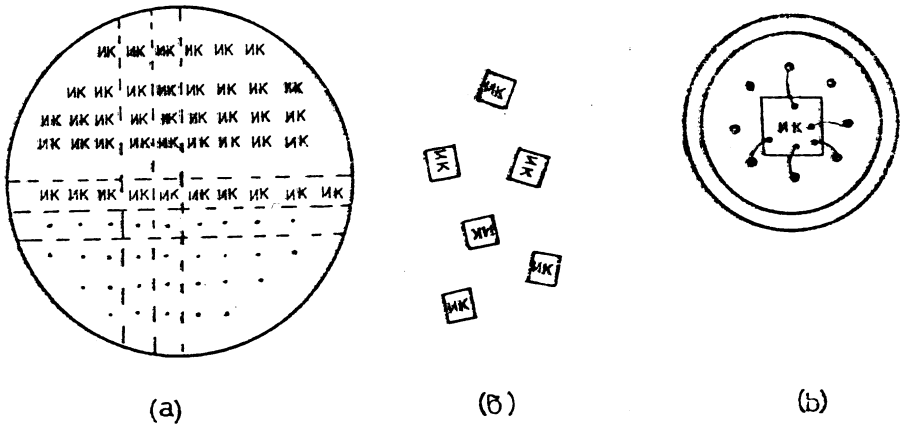
Планарната технологија врз силициум се појави во полупроводничката техника во 1959 година, и тоа како резултат на настојувањата да се зголеми ефикасноста на производството на дискретни транзистори. Набргу таа се покажа како извонредно погодна за изработка на монолитни интегрални кола затоа што по својата природа овозможува реализирање на елементи со мали димензии и дава можност за едноставно поврзување на повеќе елементи во една компактна целина. Називот планарна потекнува оттаму што оваа технологија резултира во формирање елементи кои се практично планарни, т.е. кај кои едната од димензиите, т.е. онаа што пробива во силициумската подлога, е многу помала од другите две.

Со појавата на планарната технологија врз силициум дојдоа до полн израз предностите на силициумот во однос на германиумот. Силициумот практично преку ноќ стана основен полупроводнички материјал во електрониката.

Планарната технологија се состои од следниве основни постапки:

- епитаксија,
- термичка оксидација,
- фотолитографија,
- дифузија на примеси,
- метализација.

Под принципот на групно процесирање подразбираме паралелно процесирање на повеќе идентични интегрални кола врз заедничка полупроводничка подлога - плочка (сл.1.1). Дијаметарот на плочката обично изнесува околу 10 cm, така што, во зависност од големината на чипот, се добиваат наеднаш неколку стотици до неколку илјади исти интегрални кола.



Сл.1.1. Принцип на групно изготвување интегрални кола

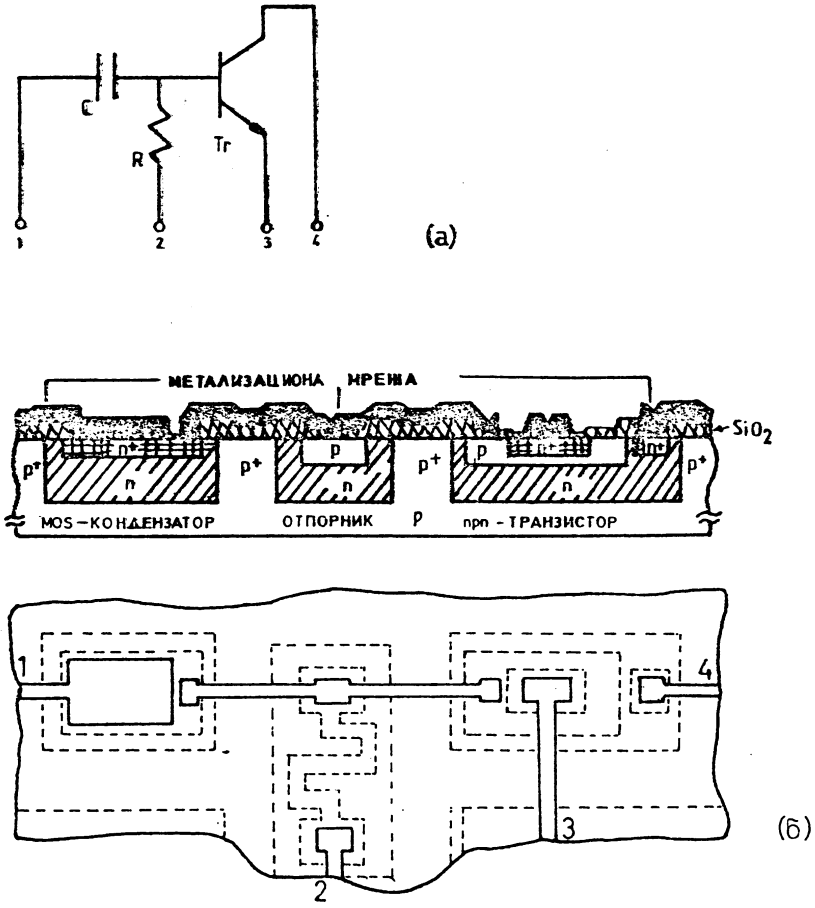
а) силициумска плочка со интегрални кола
б) одделни интегрални кола (чипови)
в) готово интегрално коло (чип во куќиште)

Принципот на основен елемент се состои во тоа што целиот технолошки процес се ориентира кон оптималното изготвување на основниот елемент. Сите други елементи треба да се изготвуваат, по можност, истовремено со основниот елемент, без дополнителни технолошки операции.Така, на пример,кај биполарните интегрални кола отпорниците се изготвуваат истовремено со базниот слој на npn-транзисторот и затоа имаат иста дебелина и иста распределба на концентрацијата на примесните атоми како и базниот слој.

Како илустрација на структурата на монолитните интегрални кола, на сликата 1.2-б се дадени напречниот пресек и топологијата на чип кој претставува реализција во монолитна интегрална форма на едноставното коло од сликата 1.2-а.

Освен постапките на планарната технологија наведени погоре, за изготвувањето на монолитните интегрални кола се неопходни и следниве две подготвителни операции:

- изготвување монокристална силициумска плочка
- изготвување комплет фотошаблони.



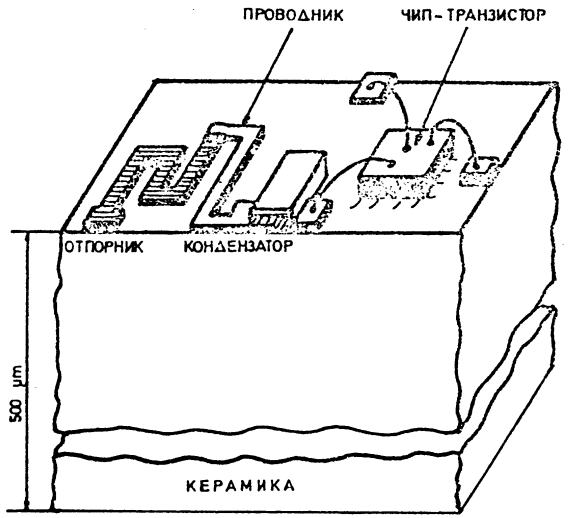
Сл.1.2. Пример на реализација на коло во монолитна интегрална техника

а) шема на реализираното коло
б) напречен пресек и топологија на чипот

1.4. Хибридни интегрални кола[1-3]

Како што веќе споменавме, хибридните интегрални кола претставуваат комбинација од пасивни елементи, кои се изведени по пат на селективно нанесување на проводнички, отпорнички и изолациони филмови врз заедничка диелектричка плочка и активни

елементи - познати како чип-компоненти - кои се изведени во вид на чипови без куќите (сл.1.3). Притоа, во случајот на дебелослојните интегрални кола, филмовите се нанесуваат според методот на ситопечат што резултира во филмови со дебелина од околу 20 μm, а во случајот на тенкослојните интегрални кола, за нанесување филмови се користат постапките на термичко напарување, односно катодно распрашување кои резултираат во филмови чија дебелина не е поголема од 2 μm.



Сл.1.3. Структура на хибридното интегрално коло

Хибридните интегрални кола се одликуваат со истите предности во однос на колата со дискретни елементи со кои се одликуваат монолитните интегрални кола, т.е. со поголема надежност, помали димензии и тежина, помала потрошувачка на моќност и пониска цена. Сепак, наведените предности - особено кога се работи за надежноста, димензиите и тежината - се изразени многу повеќе кај монолитните интегрални кола отколку кај хибридните интегрални кола.

Освен транзисторите и диодите, како чип-компоненти можат да се јават и кондензаторите, особено кога се потребни кондензатори со капацитивности поголеми од неколку стотини пикофаради.

Често пати како чип-компоненти се јавуваат и цели монолитни интегрални кола (интегрални чип-компоненти) со повеќе стотици или илјади транзистори во себе. Вообичаено е хибридните интегрални кола со интегрални чип-компоненти да се реферираат како хибридни интегрални кола со голем степен на интеграција. Јасно, овие интегрални кола понекогаш можат да вршат дури и посложени функции од дадени монолитни интегрални кола со голем степен на интеграција.

Стандардните димензии на хибридните интегрални кола обично се движат од 1 до 15 cm^2 . Притоа, густината на пакувањето е значително помала отколку кај монолитните интегрални кола.

Хибридната и монолитната интегрална техника се технички што меѓусебно се надополнуваат. Притоа, секоја од нив има свое подрачје на примена.[1/] Монолитната техника е попогодна за оние склопови што се произведуваат во големи серии и кои имаат голем степен на интеграција, а хибридната техника е извонредна кога се работи за реализација на специјални склопови и склопови што не се произведуваат во големи серии. Имено, хибридната техника овозможува изведби со поголема прецизност и помала температурна зависност, како и работа со поголеми напони и моќности отколку монолитната интегрална техника. Доколку бројот на примероците во серијата не преминува неколку десетици илјади, хибридната техника е и порентабилна од монолитната.

1/ Во текот на шеесеттите години, кога монолитните интегрални кола доживувајќи извонредно брз напредок ги фрлија во сенка хибридните интегрални кола, постоеше мислење дека овие две техники се меѓусебно конкурентни.

2. ОСНОВНИ ТЕХНОЛОШКИ ПОСТАПКИ ВО ФАБРИКАЦИЈАТА НА МОНОЛИТНИТЕ ИНТЕГРАЛНИ КОЛА

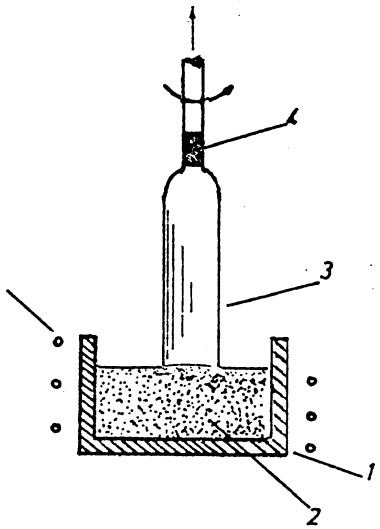
2.1. Изготвување монокристална силициумска плочка[2,5,13-15]

Изготвувањето на монокристалната силициумска плочка започнува со изготвувањето на т.н. монокристален силициумски ингот.

Монокристалниот силициумски ингот, како и инготите од други полупроводници, се добива обично по пат на кристализација од растоп - по методот на Чохралски. На сликата 2.1 е дадена принципиелна илустрација на овој метод. Имено, оска со прикачен никулец (мал силициумски монокристал) се доведува во контакт со растоп од силициум, а потоа бавно се подигнува со истовремена ротација. По никулецот ќе почне да се извлекува и да расте саканиот монокристален ингот. Типичната вредност на дијаметарот на така добиениот ингот изнесува 80 mm, а максималната може да достигне 120 mm, па и повеќе. Должината на инготот обично не е поголема од 1 m. Кристалографската ориентација на инготот (на неговиот напречен пресек) ќе биде одредена со кристалографската ориентација на никулецот. Најчесто се користат инготи чиј напречен пресек лежи во рамнината (111) или (100).

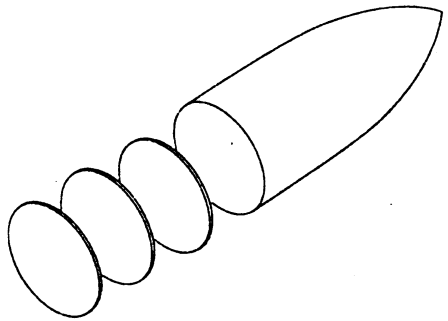
По извлекувањето, силициумскиот ингот се реже на множество тенки плочки (сл.2.2) со помош на специјална дијамантска пила. Овие плочки, чија дебелина обично се движи од 0,4 до 0,5 mm, ќе бидат подоцна користени како подлога на монолитните интегрални кола.

Површината на плочката по режењето е многу нерамна (рапава): димензиите на гребнатините, вдлабнатините и испакнатите се многу поголеми од димензиите на идните елементи на интегралните кола. Затоа, пред да се почне со основните технолошки операции, се врши повеќестепено брусење на плочките, а потоа и полирање. Дебелината на плочката по завршувањето со брусењето и полирањето изнесува околу 200 μm.



1 - сад
2 - растоп на силициум
3 - нараснуван монокристал (ингот)
4 - никулец
5 - навивка за високочестотно загревање

Сл.2.1. Шема на нараснувањето на монокристален ингот според методот на Чохралски



Сл.2.2. Монокристален силициумски ингот режен во плочки.

2.2. Епитаксија[1-5, 17-19]

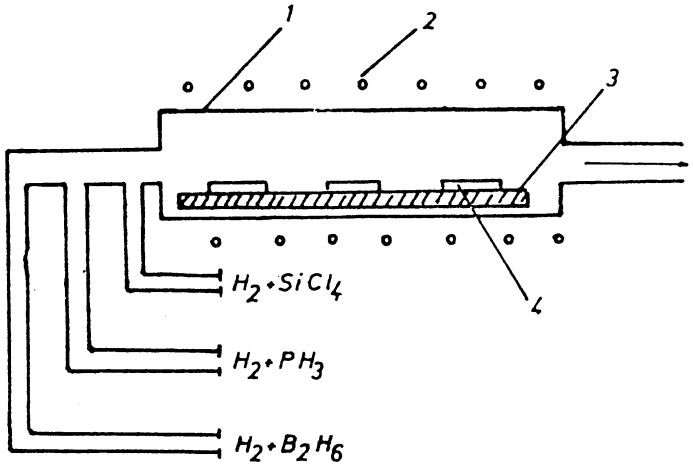
Под епитаксија се подразбира постапка на нараснување на монокристален слој врз дадена полупроводничка подлога, при што кристалната решетка на нараснатиот слој се надоврзува, без

нарушување на периодичноста, на кристалната решетка на подлогата. Оваа постапка овозможува добивање тенок работен слој од хомоген полупроводник врз дадена силициумска плочка.

Во практиката, како типична се јавува т.н. хлоридна епитаксија (сл.2.3). Монокристални силициумски плочки, полирани и чисти, се поставуваат во специјална кварцна цевка - епитаксијален реактор. Низ цевката се пропушта водород кој содржи мал процент на силициумов тетрахлорид - $SiCl_4$. При висока температура (околу 1200^oC), која се обезбедува со високочестотно загревање на специјалниот сад врз кој се поставени плочките, доаѓа до следнава реакција врз површината на плочките:

$$SiCl_4 + 2H_2 = Si + 4HCl$$

Како резултат на оваа реакција, врз плочките постепено нараснува слој од чист силициум, а пареите од настанатиот HCl се изнесуваат надвор од садот со струењето на водородот.

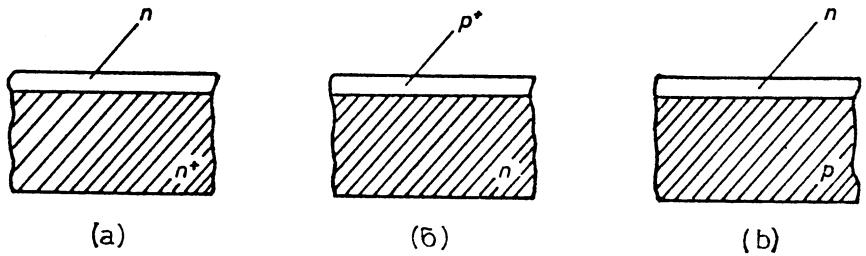


Сл.2.3. Шематски приказ на хлоридната епитаксија

1 - кварцна цевка
2 - навивки за високочестотно загревање
3 - специјален сад за поставување на плочките
4 - силициумска плочка

Ако кон пареите на силициумовиот тетрахлорид се приклучат пареи од соодветни соединенија на бор или на фосфор (обично B_2H_6, односно PH_3), епитаксијалниот слој нема да биде повеќе интринсичен туку, соодветно, од p или од n-тип, бидејќи во текот на реакцијата во нараснуваниот слој ќе навлегуваат акцепторски атоми на бор или донорски атоми на фосфор. На тој начин, епитаксијата овозможува нараснување на монокристален слој од произволен тип проводност и произволна специфична отпорност врз плочка од, исто така, произволен тип проводност и произволна специфична отпорност (сл.2.4).

Епитаксијата суштествено го пополнила арсеналот на планарната технологија, односно полупроводничката технологија воопшто.



Сл.2.4. Примери на епитаксијални структури

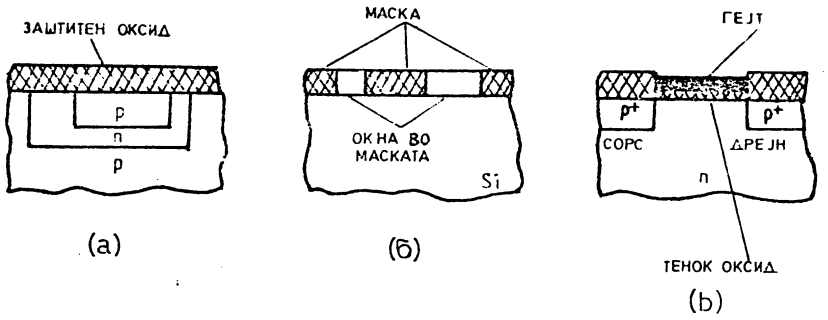
а) филм од n-тип на n^+-подлога
б) филм од p^+-тип на n-подлога
в) филм од n-тип на n-подлога

Имено, добивањето на толку тенки хомогени полупроводнички слоеви (1 до 10 μm), какви што обезбедува епитаксијата, е невозможно со други постапки.

2.3. Термичка оксидација[1-5,17]

Термичката оксидација на силициумот е една од најкарактеристичните постапки во технологијата на современите интегрални кола. Притоа, добиениот филм од силициумдиоксид (SiO_2) врши неколку важни функции, и тоа:

- функција на заштита и пасивизација на површината на силициумот, односно на заштита на вертикалните делови од pn-споевите што излегуваат на површината (сл.2.5-а),
- функција на маска низ чии отвори (окна) се внесуваат неопходните примеси (сл.2.5-б),
- функција на тенок диелектрик под гејтот на MOS-транзисторот (сл.2.5-в).



Сл.2.5. Функции на филмот од силициумов диоксид

а) пасивизација на површината
б) маска за селективна дифузија
в) тенок оксиден слој под гејтот

Ваквите широки можности на силициумовиот диоксид се една од причините за прифаќањето на силициумот како основен полупроводнички материјал во изготвувањето монолитни интегрални кола.

Оксидација на силициумот обично се врши при висока температура (1000 до 1200^{o}C), во атмосфера на кислород или водена пареа, а според релациите:

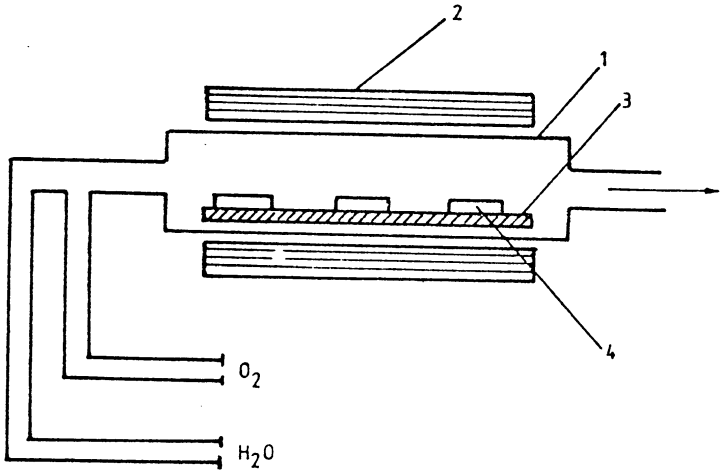
$$Si + O_2 \rightarrow SiO_2$$

$$Si + 2H_2O \rightarrow SiO_2 + 2H_2$$

Постапката се спроведува во т.н. оксидациона печка. Основата на таквата печка ја сочинува, како и при епитаксијата, кварцна цевка, во која силициумските плочки се внесуваат на тој начин што претходно се поставуваат во специјален сад (сл.2.6).

Брзината на нараснувањето на дебелината на оксидниот филм е функција од температурата и од атмосферата во која се врши оксидацијата (сл.2.7). Од сликата се гледа дека таа расте со температурата и дека при дадена температура е многу поголема ако оксидацијата се врши во атмосфера на водена пареа отколку во атмосфера на кислород.

При термичката оксидација доаѓа до поместување (спуштање) на површината на силициумот во однос на почетната положба, што е разбирливо ако се има предвид дека силициумовите атоми потребни за формирање на слојот од SiO_2 се земаат од подлогата. Поместувањето изнесува околу 46% од дебелината на нарастатиот оксиден филм.

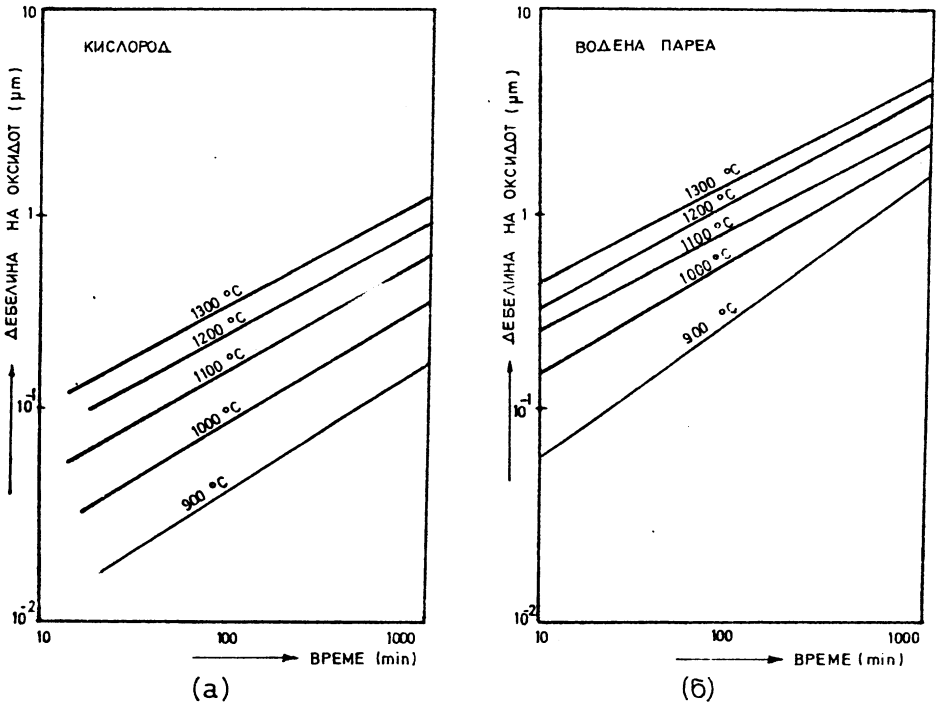


Сл.2.6. Шематски приказ на постапката на термичка оксидација

1) кварцна цевка
2) грејач
3) специјален сад (кварцен) за поставување на плочките
4) силициумска плочка

Еден од значајните проблеми што се јавуваат при нараснувањето филмови од SiO_2 е проблемот на обезбедување задоволителна хомогеност на филмовите, т.е. отсуство на дефекти (микро и макро-пори) во нив. Квалитетот на оксидниот слој се зголемува

со намалување на температурата на оксидацијата. Освен тоа, подобар квалитет се добива при оксидација во атмосфера на кислород отколку во атмосфера на водена пареа. Затоа тенкиот оксиден слој под гејтот, од чиј квалитет зависи стабилноста на параметрите на MOS-транзисторот, обично се добива со оксидација во атмосфера на кислород. Од друга страна, дебелите оксидни филмови - што се користат за пасивизација на површината и во улога на оксидни маски - се добиваат со наизменична примена на оксидација во атмосфера на кислород, односно оксидација во атмосфера на водена пареа; првото обезбедува отсуство на дефекти, а второто овозможува скратување на времетраењето на постапката.



Сл.2.7. Зависност на дебелината на филмот од SiO_2 од времетраењето на оксидацијата

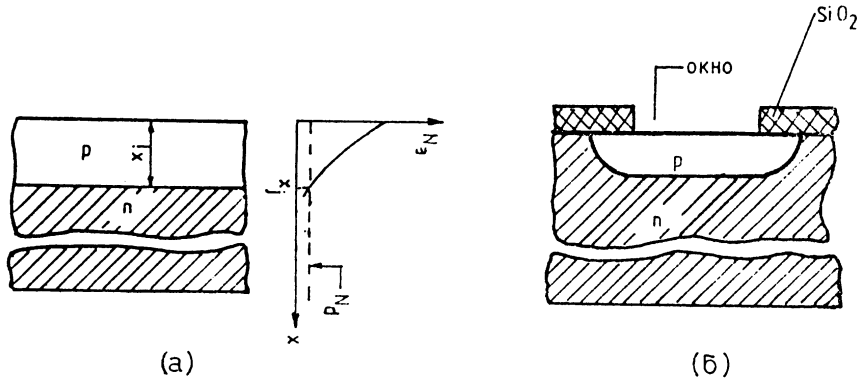
а) оксидација во атмосфера на кислород
б) оксидација во атмосфера на водена пареа

2.4. Дифузија на примеси[1-6,17-19]

Внесувањето примеси во полупроводничка плочка или во епитаксијален слој по пат на дифузија на примесни атоми од површината на плочката кон нејзината внатрешност, во услови на висока температура (најчесто 900 до 1300°C), претставува основен начин на добивање pn-споеви во планарната технологија.

Дифузијата на примеси може да биде општа или селективна. Во првиот случај таа се реализира по целата површина на плочката (сл.2.8-а), а во вториот случај - на определени делови од плочката одредени со отворите на дадена маска, изведена обично во нараснат слој од SiO_2 (сл.2.8-б).

Општата дифузија доведува до формирање тенок дифузен слој во плочката, кој за разлика од епитаксијалниот е нехомоген (по длабочина) (види ја кривата $N_a(x)$ на сликата 2.8-а).



Сл.2.8. Општа (а) и селективна (б) дифузија на примеси во силициумот

Во случајот на селективна дифузија, примесите се распространуваат не само во насока на нормалата на плочката туку и во сите насоки нормални на нормалата, т.е. и под маската. Како резултат на оваа т.н. странична дифузија, делот од pn-спојот што излегува на површината станува "автоматски" заштитен со оксидниот филм.

Дифузијата може да се спроведува не само еднократно туку и повеќекратно. На пример, во дадена плочка од n-тип,

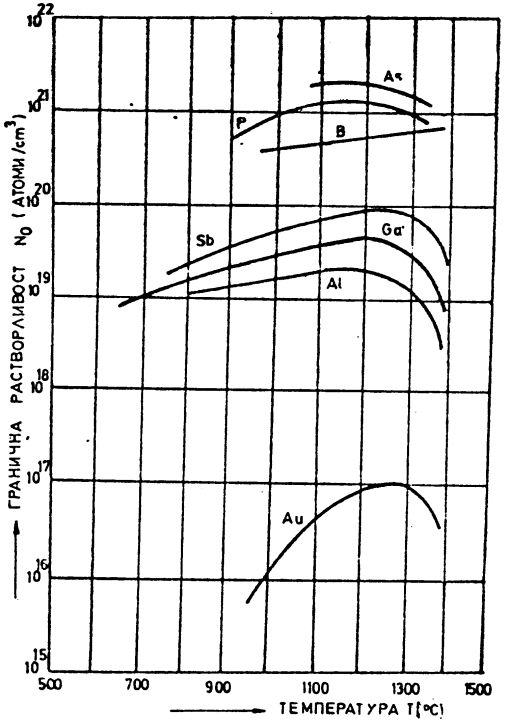
за време на првата дифузија може да се внесат акцепторски атоми и да се добие p-слој, а потоа за време на втората дифузија во добиениот p-слој да се внесат (на помала длабочина) донорски примеси и на тој начин во p-слојот да се добие n-слој. Очигледно, двете сукцесивни дифузии ќе резултираат во трислојна структура. На овој начин се реализираат, на пример, npn-транзисторите.

При спроведувањето на повекекратна дифузија треба да се има предвид дека концентрацијата на секоја новововедена примеса треба да биде поголема од концентрацијата на претходната (инаку нема да дојде до промена на типот на проводноста, т.е. до формирање на pn-спој) и дека концентрацијата на примесни атоми во силициумот (или во кој и да било друг полупроводник) не може да биде произволно голема туку таа е ограничена со параметарот познат како гранична растворливост. Граничната растворливост по дефиниција е еднаква на максималната можна концентрација на примесни атоми во силициум (или во кој и да било друг полупроводник) и зависи од типот на примесата и од температурата (сл.2.9). Со оглед на горе споменатите ограничувања, бројот на последователните дифузии во практиката е ограничен на три.

Примесите што се воведуваат по пат на дифузија се викаат дифузанти (бор, фосфор и др.). Како извори на дифузантите се јавуваат нивните хемиски соединенија, кои можат да бидат течности (BBr_3, POCl), тврди тела (B_2O_3, P_2O_5), или гасови (B_2H_6, PH_3).

Како и епитаксијата и термичката оксидација, и дифузијата на примеси обично се остварува преку гасотранспортна реакција. За таа цел се користат или еднозонски или двозонски дифузни печки.

Двозонските печки се користат во случајот кога изворот на дифузантот е цврст. Во таквите печки (сл.2.10) постојат две високотемпературни зони: едната за испарување на изворот на дуфузантот, а втората - за дифузијата. Пареата од изворот на дифузантот, добиена во првата зона, му се придружува на неутралниот гас-носител (обично аргон или азот) што тече низ печката (кварцна цевка) и, заедно со него, доаѓа до втората зона, каде што се поставени силицумските плочки. Температурата во втората



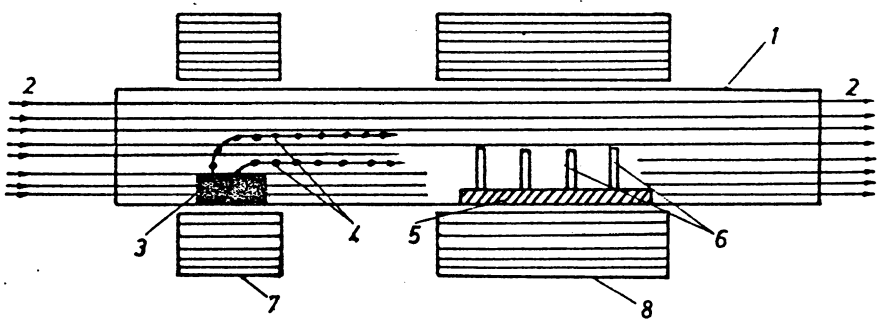
Сл.2.9. Граничната растворливост на примеси во силициум како функција од температурата

зона е повисока отколку температурата во првата зона. Како резултат на високата температура, доаѓа до декомпозиција на пареата од изворот на дифузантот, т.е. до одвојување на дифузантот и негово депонирање врз површината на плочката. Така депонираните примесни атоми се растворааат во силициумот и почнуваат да дифундираат кон длабочината на плочката. Другите компоненти на изворот на дифузантот излегуваат надвор од печката, заедно со гасот носител.

Во случајот на течни, односно гасообразни извори на дифузанти,се користат еднозонски дифузни печки. Имено, овде нема потреба од високотемпературно испарување бидејќи изворите на дифузантите при влегувањето во печките веќе се наоѓаат во гасна состојба.

Ако дифузијата се врши така што површинската концентрацијата на внесуваните примеси се одржува константна през целиот тек на постапката, станува збор за дифузија од неограничен извор. Може да се покаже дека во таков случај дистрибуцијата на внесените примесни атоми во произволен момент t од почетокот на дифузната постапка (сл.2.11-а) ќе биде дадена со изразот:

$$N(x,t) = N_s \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \qquad (2.4.1)$$



Сл.2.10. Шема на двозонска дифузна печка

1) кварцна цевка
2) гас носител
3) извор на дифузантот
4) пареи од изворот на дифузантот
5) специјален сад (кварцен) со силициумските плочки
6) силициумска плочка
7) грејач на првата високотемпературна зона
8) грејач на втората високотемпературна зона

Овде, N_s е површинската концентрација на примесните атоми, x е растојанието од површината на плочката, а D е т.н. дифузен коефициент. Функцијата erfc(z) е комплементарната функција на грешка, т.е.

$$\text{erfc}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_z^{\infty} \exp(-y^2)dy \qquad (2.4.2)$$

Во практиката, површинската концентрација на примесните атоми N_s е најчесто определена со граничната растворливост N_o, т.е. обично е $N_s=N_o$. Овде треба да се истакне дека граничната растворливост (како феномен) и нејзината слаба зависност од температурата се две работи од големо техничко значење. Имено, тие обезбедуваат релативно едноставна контрола на условите за реализација на дифузија од неограничен извор, бидејќи гарантираат слабо влијание на неизбежните варијации на парцијалниот притисок на изворот на дифузантот и на температурата на процесот врз вредноста на површинската концентрација N_s доколку важи $N_s=N_o$.

Во табелата 2.1. се дадени вредностите на граничната растворливост N_o и дифузниот коефициент D за бор, односно фосфор во силициум при неколку карактеристични температури.

Табела 2.1. Гранична растворливост и дифузен коефициент на бор односно фосфор во силициум

Температура (^oC)	Бор		Фосфор	
	N_o, cm^{-3}	D, $\mu m^2/h$	N_o, cm^{-3}	D, $\mu m^2/h$
950	$4,5x10^{20}$	$1,6x10^{-3}$	$8,5x10^{20}$	$1,7x10^{-3}$
1000		$5,2x10^{-3}$	$1,0x10^{21}$	$6,4x10^{-3}$
1050	$5,0x10^{20}$	$1,7x10^{-2}$	$1,1x10^{21}$	$2,0x10^{-2}$
1100		$5,8x10^{-2}$	$1,2x10^{21}$	$7,3x10^{-2}$
1150	$5,2x10^{20}$	$1,6x10^{-1}$	$1,3x10^{21}$	$1,8x10^{-1}$

Освен дифузијата од неограничен извор, за која беше расправано погоре, во практиката како многу значајна се јавува и т.н. дифузија од ограничен извор. Во случајот на дифузија од ограничен извор, во површинскиот слој на силициумовата плочка најнапред се внесува, на соодветен начин, одредено количество примесни атоми, т.е. се врши предепозиција. Потоа, плочката се загрева на температурата на која ќе се одвива дифузијата и се држи на таа температура во услови што го спречуваат излегувањето на внесените примесни атоми надвор од плочката. Конечен резултат на сето тоа е дифундирање на внесените примесни атоми кон длабочината на плочката, т.е. настанува редистрибуција.

Излегувањето и на примесните атоми надвор од плочката се спречува со нараснување тенок слој од SiO_2 врз нејзината површина. Имено, за време на дифузијата и тоа во текот на првите триесетина минути на процесот, низ дифузната печка (кварцната цевка) се пушта да струи водена пареа или кислород. Оваа оксидациона атмосфера во постојните услови на висока температура доведува до создавање на споменатиот оксиден филм. Откако дебелината на оксидниот филм ќе достигне задоволителна вредност, што обично не трае повеќе од триесетина минути, оксидационата атмосфера се заменува со неутрална атмосфера, т.е. низ дифузната

печка се пушта да струи неутрален гас, обично азот или аргон.

Може да се покаже дека во случајот на дифузија од ограничен извор, кога дебелината на претходно депонираниот површински слој од примесни атоми може да се игнорира, профилот на концентрацијата на внесените примеси во даден момент t од почетокот на дифузната постапка (сл.2.11-б) ќе биде одреден со изразот:

$$N(x,t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} \exp \frac{-x^2}{4Dt} \qquad (2.4.3)$$

Овде Q претставува број на предепонирани примесни атоми по единица плоштина.

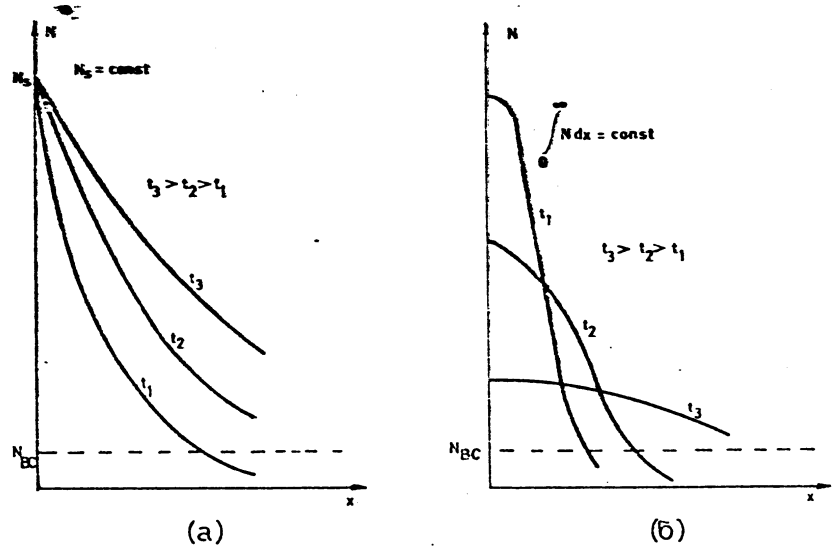
Предепонирањето на примесни атоми пред изведувањето на дифузија од ограничен извор обично се остварува како плитка дифузија од неограничен извор или (поретко) со помош на методот познат како јонска имплантација.

Во случајот кога предепозицијата се реализира како дифузија од неограничен извор, за целокупната дифузна постапка, во која се опфатени и предепозицијата и редистрибуцијата (т.е. дифузијата од неограничен извор и сукцесивната дифузија од ограничен извор), се користи називот двочекорна дифузија.

Анализирајќи ги изразите (2.4.1) и (2.4.3), гледаме дека времето t и дифузниот коефициент D се јавуваат само во склопот на изразот $\sqrt{Dt}$, никогаш засебно. Тоа значи дека нивното влијание врз обликот на распределбата на дифундираните атоми е идентично, т.е. дека зголемувањето на дифузниот коефициент доведува до истиот ефект како и продолжувањето на времетраењето на дифузијата. Величината $\sqrt{Dt}$ има димензии на должина и е позната како карактеристична должина.

Со оглед на силно изразената зависност на дифузниот коефициент од температурата (сл.2.12), како и на погоре изнесеното, произлегува дека основни параметри што треба да се контролираат при реализацијата на дифузен слој со одредена длабочина се времетраењето и температурата на дифузијата. Притоа, контролата на температурата мора да биде многу построга

отколку контролата на времетраењето, бидејќи дифузниот коефициент е практично експоненцијална функција од температурата. Обично, дозволената нестабилност на температурата изнесува $\pm 2^{o}C$.



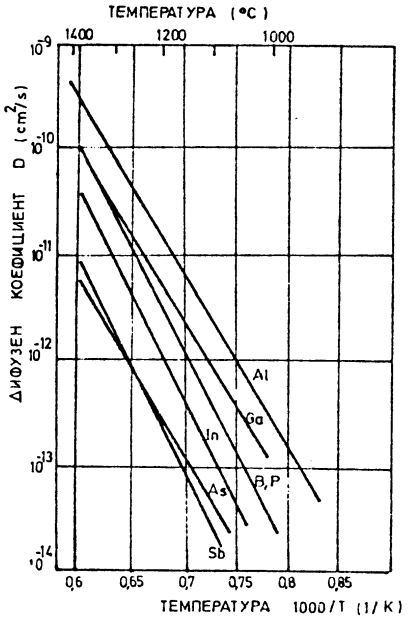
Сл.2.11. Распределба на примесите при дифузија од неограничен (а) и ограничен (б) извор за разни моменти на времето

Под длабочина (дебелина) на дифузниот слој се подразбира длабочината на металургиската граница, т.е. координатата $x=x_j$ при која концентрација N на внесените примесни атоми е еднаква на концентрацијата N_{BC} на постојните примесни атоми во плочката (сл.2.11). Така, за дифузија од неограничен извор, согласно со (2.4.1), е:

$$x_j = 2\sqrt{Dt}\ \mathrm{erfc}^{(-1)} \frac{N_{BC}}{N_s} \qquad (2.4.4)$$

каде што $\mathrm{erfc}^{(-1)}$ е ознака за инверзната функција на функцијата erfc, а за дифузија од ограничен извор, согласно со (2.4.3), добиваме:

$$x_j = 2\sqrt{Dt}\left(\ln \frac{Q}{N_{BC}\sqrt{\pi Dt}}\right)^{1/2} \qquad (2.4.5)$$



Сл.2.12. Дифузни коефициенти на примесите во силициумот

Дифузните коефициенти на донорските, односно акцепторските примеси се далеку помали во силициумовиот диоксид отколку во силициумот. Токму затоа силициумовиот диоксид е погоден материјал за реализација на маски за селективна дифузија.

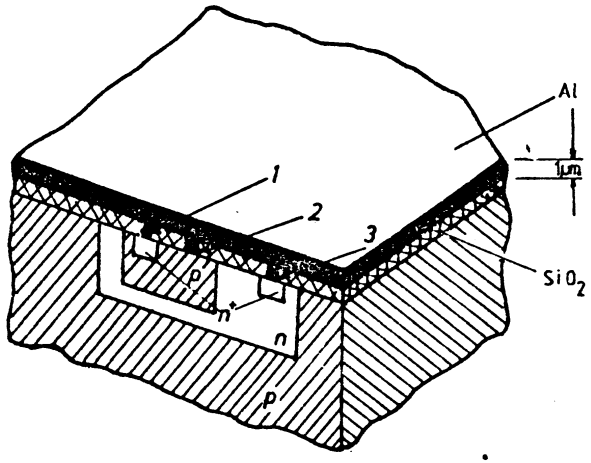
2.5. Метализација[1-3,11,17]

Метализацијата претставува постапка на нанесување метал врз силициумската плочка (сл.2.13). Таа се врши по реализирањето на елементите на колото, а со цел по фотолитографски пат да се формира металиѕационата мрежа, т.е. потребните омски контакти со одредени слоеви во силициумот, проводничките врски меѓу елементите и потребните контактни површини (сл.2.14).

Металниот филм се нанесува врз претходно формирана (со помош на фотолитографска постапка) маска од SiO_2, која има отвори на местата на кои треба да бидат создадени омските контакти. Низ овие отвори (1,2 и 3 на сл.2.13 и сл.2.14) металниот филм, кој во најголемиот дел лежи врз филмот од SiO_2, доаѓа во контакт со соодветните слоеви во силициумот. Типичната вредност на дебелината на металниот филм изнесува 1 μm.

Како основен материјал за метализација служи алуминиумот. Тоа е затоа што тој подобро од другите метали, гледано во целост, ги задоволува барањата што се поставуваат пред метализацијата. Тие барања се следниве:

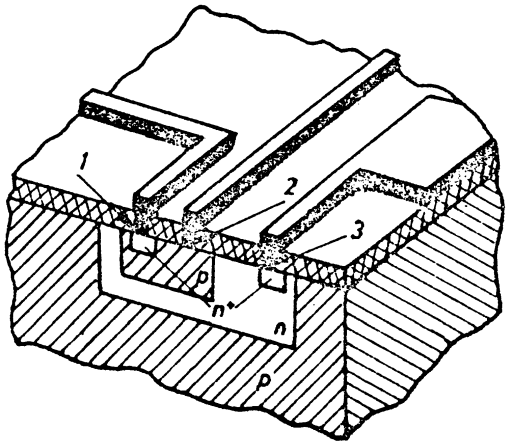
- **формирање ненасочувачки контакт со силициумот,**
- **мала специфична отпорност,**
- **добра атхезија во однос на SiO_2,**
- **добро одведување топлина,**
- **отсуство на корозија,**
- **ниска цена.**



Сл.2.13. Силициумска плочка со нанесен метален филм

Формирањето ненасочувачки (омски) контакти меѓу алуминиумот и силициумот е поврзано со одредени проблеми. Ако нанесувањето на алуминиумот се врши при температура пониска од евтектичката точка на системот Al-Si (околу 580°C), тогаш се формираат Шоткиеви бариери кои во случајот на силициум од n-тип не се омски туку се насочувачки. Затоа, за да се избегне формирањето Шоткиеви бариери, нанесувањето се врши при температура нешто повисока од 580°C. Но, и високата температура на нанесувањето не го решава (сама по себе) во целост проблемот на формирање несакан насочувачки контакт. Имено, при таква температура на границата меѓу силициумот и нанесениот алуминиум се формира слој од раствор на алуминиум во силициум кој по оладувањето поминува во силициум легиран со алуминиум, со концентрација на алуминиумовите атоми од околу $5x10^{18} cm^{-3}$. Бидејќи алуминиумот претставува акцепторски материјал во однос на силициумот, во случајот кога се формира контакт со силициум од n-тип

може да дојде до наткомпензација на нето-донорската концентрација во силициумот, т.е. да се формира pn-спој, па значи и несакан насочувачки контакт. Ова се избегнува на тој начин што во подрачјето каде што треба да биде формиран контактот со силициум од n-тип претходно се зголемува нето-донорската концентрација, т.е. се формира тенок n^+-слој (види го n^+-слојот под отворот 3 на сл.2.13 и сл.2.14) со нето-донорска концентрација од $10^{20} cm^{-3}$ или поголема. Во таков случај концентрацијата на алуминиумските атоми се покажува како недоволна за формирање p-слој, па формираниот контакт ќе биде ненасочувачки.



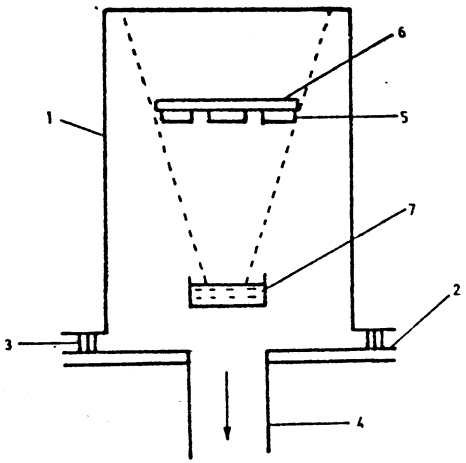
Сл.2.14. Силициумска плочка со метализациона мрежа

Ако n-слојот со кој треба да се формира контактот е силно легиран (на пример емитерскиот слој кај транзисторот), тогаш не е потребно дополнително зголемување на концентрацијата на примеси. Не претставува проблем ниту формирањето контакт со слоеви од p-тип, бидејќи тогаш растворањето на алуминиумот во нив доведува до формирање површински p^+-слоеви, што само го зголемува квалитетот на омскиот контакт.

Постојат повеќе различни начини за нанесување на металниот филм врз силициумската плочка. Еден од највообичаените е користењето на методот на термичко напарување - познат уште и како вакуумско напарување.

На сликата 2.15 е даден шематски приказ на овој метод. Метална или стаклена поклопка (1) е поставена на потпорна плоча (2). Меѓу поклопката и потпората се наоѓа затинач (3) кој обезбедува одржување вакуум во просторот под поклопката. Испумпувањето

се врши со помош на вакуумска пумпа преку соодветен канал (4). Плочките (5) врз кои треба да се врши нанесувањето на материјалот се прицврстуваат на соодветен држач (6). Материјалот (т.е. алуминиумот) што треба да се нанесува на плочките е сместен во специјален сад, наречен испарувач (7). Испарувачот вклучува во себе систем за високотемпературно загревање кој може да биде базиран на принципот на високочестотна индукција, односно индиректно отпорничко загревање или бомбардирање на материјалот со електронски млаз.



Сл.2.15. Шема на уредот за термичко напарување

Потребната температура на силициумските плочки, која како што споменавме треба да биде нешто повисока од 580^oC, се постигнува преку држачот (6), кој врши истовремено и функција на грејач. Под дејство на високата температура во испарувачот, материјалот за нанесување испарува. Така добиените слободни атоми се движат кон плочките на кои по пристигањето ќе кондензираат. Благодарение на високиот вакуум, 10^{-3} до 10^{-4} Pa, бројот на судирите на овие атоми со атомите на остаточниот гас е релативно мал. Тоа обезбедува мало расејување на нанесуваниот материјал. Исто така, високиот вакуум обезбедува и голема чистота на нанесениот филм.

2.6. Фотолитографија[2-5,17,19]

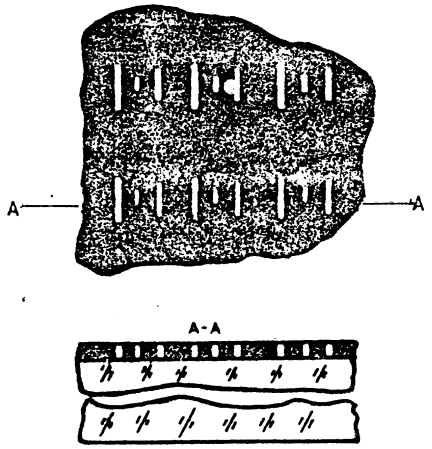
Фотолитографијата е постапка со помош на која се остваруваат следниве две важни работи во планарната технологија:

- отстранување делови од претходно нараснат (на силициумската плочка) филм од SiO_2 или од друг материјал, со цел да се добие соодветна маска за селективна дифузија,

- отстранување делови од претходно нараснат (на силициумската плочка) алуминиумски филм, со цел да се добие потребната метализациона мрежа.

Во основата на фотолитографијата лежи користењето на фотоматеријалите познати како фоторезисти. Фоторезистите не се ништо друго туку една варијанта на фотоемулзиите со кои се среќаваме во обичната фотографска техника.

Фоторезистите се осетливи на ултравиолетното зрачење Тие можат да бидат позитивни и негативни. Позитивните фоторезисти се отпорни на соодветни нагризувачи (развивачи) освен во случајот кога се осветлени со ултравиолетно зрачење. Значи, по примената на соодветен нагризувач врз филм од претходно селективно осветлен позитивен фоторезист, ќе бидат нагризени само осветлените делови. Кај негативните фоторезисти, обратно, ќе бидат нагризени само неосветлените делови (како и кај обичниот негатив).



Сл.2.16. Фрагмент од фотошаблонот (поглед од горе и напречен пресек)

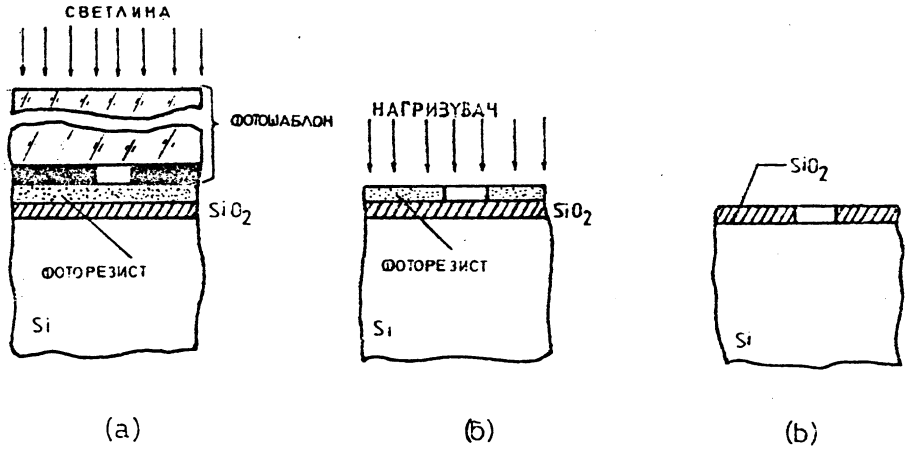
Шарата на идната оксидна маска, односно идната метализациона мрежа се изготвува во облик на фотошаблон (сл. 2.16). Фотошаблонот претставува дебела стаклена плоча на едната страна на која е нанесен тенок непросирен филм со соодветни просирни делови на оние места што ќе треба да се отстранат од оксидниот, односно од металниот филм. Димензиите на елементите на шарата одговараат во размер 1:1 на димензиите на соодветните детали на идното интегрално коло, значи можат да бидат од редот на големина на неколку микрометри. Согласно со принципот на групно процесирање, шарата на фотошаблонот претставува, всушност, периодично повторување по "редови" и "колони" на една иста шара чии димензии одговараат на големината на чипот на идното интегрално коло.

Фотолитографската постапка со која филм од SiO_2, нараснат врз површината на дадена силициумска плочка, се претвора во оксидна маска е илустрирана на сликата 2.17. Врз оксидниот филм се нанесува тенок слој (околу 1 μm) фоторезист. Откако фоторезистот ќе се исуши, врз плочката се става фотошаблонот (со шарата свртена кон фоторезистот) и се врши експонирање со ултравиолетни зраци (сл.2.17-а). Следува отстранување на фотошаблонот и развивање (нагризување) и фиксирање на фоторезистот. Ако се користи позитивен фоторезист, тогаш, по развивањето и фиксирањето, во фоторезистот ќе се добијат отвори (окна) на оние места што одговараат на просирните делови на фотошаблонот.[1/] На тој начин шарата од фотошаблонот ќе биде пренесена врз фоторезистот, т.е. слојот од фоторезист ќе биде претворен во маска прилепена кон оксидниот слој (сл.2.17-б). На крајот, низ фоторезистната маска се врши нагризување на оксидниот слој сè до силициумот. Се разбира, користениот нагризувач - главно флуороводородна (HF) киселина - не дејствува ниту врз фоторезистот ниту врз силициумот. Како резултат на нагризувањето, шарата од фоторезистот ќе се пренесе на оксидот, така што по отстранувањето на фоторезистната маска ќе се добие оксидна маска врз силициумската плочка (сл.2.17-в).

На сличен начин, со помош на фотолитографијата, се реализира и метализационата мрежа. Во овој случај, фоторезистната маска, реализирана врз претходно нанесен метален филм, овозможува нагризување и отстранување на непотребните делови од металниот филм. Значи, маската ги штити идните спојни патеки и контактни површини. Често употребувани нагризувачи за алуминиумски филмови се, на пример, киселините HCl и P_3HO_4.

Овде може да се постави прашањето: зошто за вршење на селективната дифузија не се користи директно фоторезистната маска туку таа се јавува само како меѓучекор, т.е. служи за добивање исто таква маска од SiO_2? Одговорот на ова прашање е во тоа што фоторезистот не може да ги издржи високите температури при кои обично се врши дифузијата.

1/ Ако се користи негативен фоторезист, тогаш и фотошаблонот ќе треба да биде негативен, т.е. на идните отвори на оксидната маска ќе треба да одговараат непросирни делови.



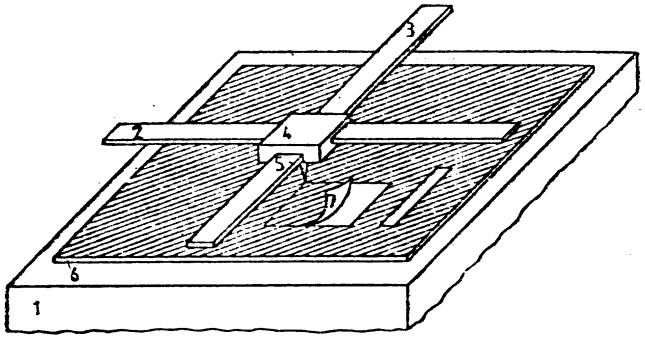
Сл 2.17. Добивање оксидна маска со помош на фотолитографска постапка

а) експозиција на фоторезистот низ фотошаблон
б) селективно нагризување на силициумовиот диоксид низ фоторезистна маска
в) оксидната маска по отстранувањето на фоторезистот

2.7. Постапка на добивање на фотошаблонот[2-5,17,19]

Како прв чекор во постапката на изготвување на фотошаблонот се јавува исцртувањето на оригиналот. Оригиналот, всушност, претставува цртеж на еден од елементите на фотошаблонот.[1/] Димензиите на оригиналот се 100 до 1000 пати поголеми од соодветните димензии на фотошаблонот. Според тоа, за чип со димензии 1,5x1,5 mm^2, димензиите на оригиналот можат да се движат од 15x15 cm^2 до 1,5x1,5 m^2, во зависност од усвоеното зголемување. Ваквото зголемување е неопходно за да се обезбеди доволно голема релативна точност во исцртувањето на елементите на шарата (апсолутната грешка што се прави при исцртувањето се движи до 25 μm, па, на пример, за да се постигне релативна грешка помала од 1% минималната димензија на деталите на шарата не смее да биде помала од 2,5 mm).

1/ Под елемент на фотошаблонот го подразбираме секторот што одговара на еден чип.



Сл.2.18. Шема на координатографот

Оригиналите се изготвуваат со помош на специјален уред наречен координатограф (сл.2.18). Координатографот претставува пулт (1) со рамна површина, над која е поставен систем од две подвижни меѓусебно нормални летви (2 и 3). На местото на пресекот е поставен лизгачки муф (4) со остар шилец (5) кој ја допира површината на пултот. Преместувајќи ги летвите паралелно сами на себе, со шилецот може да се скрајбираат вертикални и хоризонтални линии. На пултот се прицврстува стаклена или пластична плоча (6) со соодветни димензии, покриена одозгора со тенок темен филм од нитроемајл (7). Со шилецот се отсекуваат во филмот контурите на соодветните детали, а потоа се пристапува кон лупење на филмот во оние делови што кај фотошаблонот треба да бидат прозирни.

Како следен чекор се јавува фотографското пренесување на оригиналот врз фотографска плоча, со истовремено негово намалување од 10 до 50 пати, што се реализира во една или во две етапи.

Во последниот чекор, врз нова стаклена фотографска плоча се вршат, паралелно, конечното намалување на оригиналот (до сварните димензии на чипот) и неговата мултипликација, т.е. се формира фотошаблонот.

За изработка на покомплексни интегрални кола (LSI, VLSI) потребна е побрза и попрецизна техника на добивање на оригиналот од претходно изложената. Денеска оригиналите се повеќе се генерираат врз фотографска плоча со помош на компјутерски воден оптички плотер со променлива апертура. Димензиите на елементите на вака изработениот оригинал обично се 100 пати поголеми од соодветните димензии на фотошаблонот.

Фотошаблонот добиен на опишаниот начин е познат како главен фотошаблон. Тој се чува во специјална библиотека и се користи само за добивање работни фотошаблони. Работните фотошаблони се добиваат по пат на копирање, според методот на контактен фотопечат.

Јасно, секоја фотолитографска постапка бара свој фотошаблон, па бројот на различни фотошаблони потребни за реализација на едно интегрално коло ќе биде еднаков на бројот на потребните фотолитографски постапки. Овој број, во зависност од типот на колото и специфичностите во технологијата, обично се движи од 4 до 8.

2.8. Јонска имплантација[2-5,17]

Под јонска имплантација подразбираме постапка на внесување примеси во дадена полупроводничка (силициумска) плочка по пат на бомбардирање на плочката со јонизирани примесни атоми. Јонизираните примесни атоми се забрзуваат до доволно големи енергии за да можат да се пробијат во длабочината на плочката. Значи, покрај дифузијата, јонската имплантација претставува уште една можност за реализација на pn-споеви.

Јонизацијата на примесните атоми и нивното забрзување и фокусирање се вршат во специјални уреди кои се многу слични на уредите за забрзување на честици во нуклеарната физика. Во улога на примеси се користат истите материјали како и при дифузијата.

Длабочината на пробивањето на јонизираните примесни атоми ќе зависи од нивната енергија и маса. Колку што е поголема енергијата толку ќе биде поголема, во просек, и длабочината на пробивањето. Така, длабочината на слоевите добиени по пат на јонска имплантација се движи од 0,1 до 1 μm, а се постигнува со напони на забрзување од 10 до 300 kV. Напони на забрзување поголеми од 300 kV се избегнуваат бидејќи резултираат во преголеми оштетувања на кристалната решетка на полупроводникот. Треба да се забележи дека длабочината на слоевите што се добиваат

со јонска имплантација е значително помала од типичната длабочина на дифузните слоеви.

Плоштинската густина на примесните атоми во имплантираниот слој ќе зависи од густината на струјата на јонскиот млаз и од времетраењето на експозицијата. Во практиката таа обично се движи од 10^{12} до 10^{16} атоми/cm^2. Густината на струјата на јонскиот млаз може да варира од 1 μA/cm^2 до 1 A/cm^2, а времетраењето на експозицијата најчесто се движи од неколку секунди до неколку минути.

На сликата 2.19, со полна линија, е прикажана типичната распределба на примесните атоми при јонската имплантација. Како што се гледа, оваа распределба суштествено се разликува по обликот од дифузните примесни профили по тоа што нејзиниот максимум не се наоѓа на површината туку на одредена длабочина во плочката. Во близината на максимумот кривата на распределбата може доста добро да се апроксимира со Гаусовата функција.

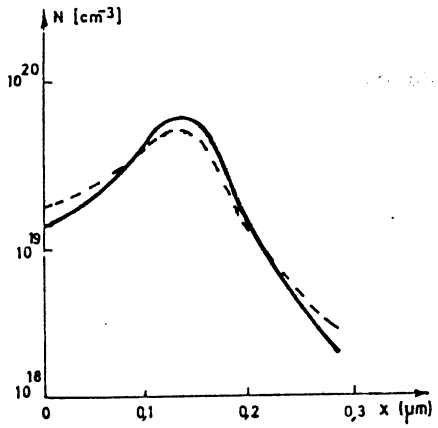
Јонската имплантација се врши во вакуум, при собна температура. Меѓутоа, по нејзиното завршување, плочката се загрева на температура од 500 до 800°C за да се намалат дефектите во кристалната решетка што настанале поради пробивањето на јонизираните примесни атоми во длабочината на полупроводникот. При загревањето - поради дифузните процеси - доаѓа до извесна (обично мала) промена во профилот на внесените примеси (види ја испрекинатата линија на сликата 2.19).

Јонската имплантација, како и дифузијата, може да биде општа или селективна. Селективната имплантација се спроведува со помош на маски од силициумдиоксид или од алуминиум. И кај двата материјала длабочината на пробивањето на примесните јони е многу помала отколку кај силициумот. Како карактеристична особеност на јонската имплантација се јавува тоа што јоните, движејќи се по права линија, се пробиваат само кон длабочината на плочката, така што овде не постои аналогија на страничната дифузија.

Во принцип, јонската имплантација, како и дифузијата, може да се спроведува и повеќекратно така што да се добијат повеќеслојни структури. Меѓутоа, потребните за таа цел усогласувања меѓу енергиите на јоните, времињата на експозициите и

режимите на загревањата се покажуваат како доста проблематични. Затоа, во практиката, јонската имплантација главно се употребува за создавање тенки единични слоеви.

Како предности на јонската имплантација во однос на дифузијата се јавуваат едноставната контрола и ниската температура на процесот.[1/] Ниската придружна температура овозможува јонската имплантација да може да се применува во произволен момент од технолошкиот циклус (на пример, и по создавањето на метализационата мрежа). Освен тоа, при нискотемпературните процеси нема потреба да се води сметка за ефектите на дополнителната дифузија на претходно внесените примеси, бидејќи овие ефекти, со оглед на релативно ниските температури, се незначајни.



Сл.2.19. Распределба на примесите при јонската имплантација

Иако јонската имплантација, како начин на внесување примесни атоми во силициумот, има сè поширока примена во производството на интегрални кола, не треба да се испушти од вид дека дифузијата сепак претставува основен начин на создавање pn-структури, а дека јонската имплантација се јавува само како нејзино дополнение.

1/Овде се мисли само на контролата на плоштинската концентрација на имплантираните примеси. Инаку, обликот на примесниот профил е тешко контролабилен. Просечната вредност и стандардната девијација на длабочината на пробивањето зависат од енергијата и типот на имплатираните честици како и од термичкиот третман по имплантацијата.

2.9. Хемиско напарување[3,5,17]

Во одредени ситуации е невозможно или непрактично да се произведе филм од силициумдиоксид по пат на термичка оксидација на силициум. Тоа се, на пример, случаите кога таков филм треба да се постави врз некој друг диелектрик или врз метал (т.е. врз подлога која не е силициумска), односно кога врз силициумска подлога треба да се реализира дебел слој од силициумдиоксид, каков што е, на пример, случајот со т.н. заштитен оксид кај MOS-структурите. Во овие случаи филмот од силициумдиоксид се добива по пат на нанесување (депозиција). За таа цел главно се користат два метода: хемиско напарување и реактивно катодно распрашување. Реактивното катодно распрашување ќе биде разгледано во глава 5.

Хемиското напарување претставува постапка на нанесување филмови по пат на хемиска реакција, во гасна фаза, во близината на подлогата. Во микроелектрониката, хемиското напарување најчесто се користи за нанесување силициумдиоксид, силициумнитрид и поликристален силициум. Епитаксијата е типичен пример на хемиско напарување. Овде, силициумската подлога овозможува напаруваниот силициум да расте како монокристал.

За нанесување слој од силициумдиоксид најчесто се користи оксидацијата на силан (SiH_4) во присуство на кислород (O_2). Процесот се довива според релацијата:

$$SiH_4 + 2O_2 \rightarrow SiO_2 + 2H_2O$$

т.е. резултат на реакцијата е силициумдиоксид и водена пареа. Силанот, кој е измешан со азот, не смее да дојде во контакт со кислородот сè додека не се приближи до подлогите, бидејќи реакцијата е бурна дури и при собна температура. Процесот не бара надворешно загревање, меѓутоа, со загревање на подлогите на околу 300°C се добива подобра униформност на филмот. Вака добиените филмови се со послаб квалитет (имаат помала густина) отколку филмовите добиени со термичка оксидација на силициум. Квалитетот може значително да се подобри ако по хемиското напарување филмовите се изложат на водена пареа при температура од 800 до 900°C за време од околу 15 минути.

2.10. Основни чекори при реализацијата на монолитни интегрални кола[1-7,10]

Во претходните секции беа презентирани најважните технолошки постапки во фабрикацијата на монолитните интегрални кола, што беше и основна задача на оваа глава. Презентацијата ќе ја заокружиме на тој начин што ќе ги проследиме, по ред, базичните чекори што треба да се направат за да се дојде до дадено интегрално коло, претпоставувајќи дека имаме на располагање силициумска плочка со соодветен тип на проводност, односно со соодветна дебелина и потребна глаткост на страната на која ќе се реализира интегралното коло.

Како пример ќе го земеме колото од сликата 1.2. Вакво коло е формирано според чекорите прикажани на сликата 2.20, а опишани подолу.

Чекор 1: епитаксијален раст. На плочка од p-тип, со дебелина од околу 200 μm, се нараснува епитаксијален слој од n-тип. Дебелината на епитаксијалниот слој е значително помала од дебелината на плочката и обично изнесува околу 10 μm. По завршувањето на епитаксијалниот раст, врз целата површина на плочката се формира - со постапката на термичка оксидација - тенок слој (обично 0,5 μm) од SiO_2.

Чекор 2: изолациона дифузија. Целта на овој чекор е добивање изолациони острови во кои ќе бидат вградени елементите на колото. Тоа се постигнува со помош на т.н. изолациона дифузија која се состои во следново: првин, со помош на фотолитографска постапка се отстрануваат одредени делови од слојот SiO_2 со цел да се добие соодветна маска, а потоа оваа маска се користи ва селективна дифузија на примеси од p-тип (обично бор).

Изолационите острови служат за обезбедување електрична изолација меѓу елементите на колото и подлогата. Тоа се постигнува со инверзна поларизација на pn-споевите меѓу n-подрачјата и подлогата, т.е. со држење на подлогата на понизок потенцијал од кој и да било изолационен остров.

Изолационата дифузија се изведува или како дифузија од неограничен извор или, што е почесто, како двочекорна дифузија. Ако се работи за двочекорна дифузија, како што се претпоставува на сликата 2.20, во текот на вториот чекор (редистрибуцијата) се нараснува нов оксиден слој врз постојниот и се затвораат отворите на маската за изолациона дифузија. Имено, вториот чекор на двочекорната дифузија се врши секогаш во оксидациона атмосфера, а со цел - преку затворање на отворите на маската - да се спречи излегувањето на претходно внесените примесни атоми.

Чекор 3: базна дифузија. Со помош на фотолитографска постапка се реализира нова оксидна маска. Следува дифузија на примесни атоми од p-тип (најчесто бор) која е позната како базна дифузија. На овој начин се формира базното подрачје на транзисторот, како и подрачјето што ќе служи како отпорник.

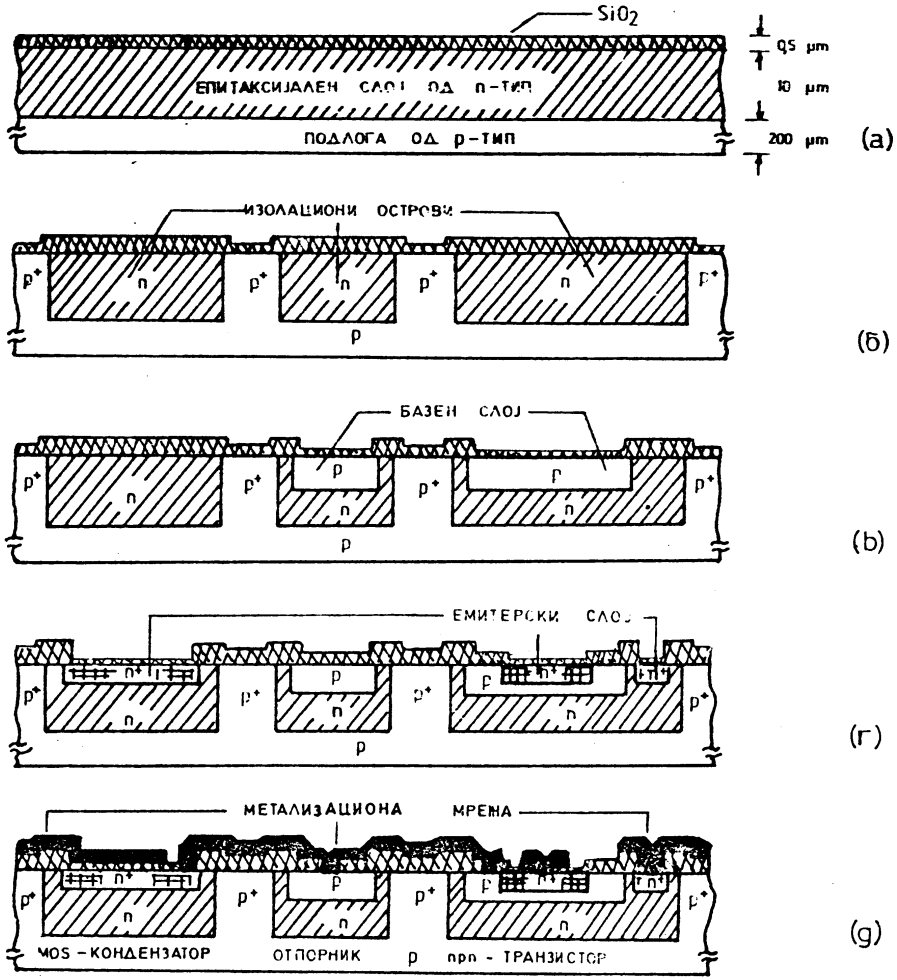
Базната дифузија редовно се изведува како двочекорна.

Подрачјето од n-тип, што останува меѓу p-подрачјето добиено со базната дифузија и подрачјето на подлогата, е познато како колекторско подрачје бидејќи кај npn-транзисторот тоа подрачје ќе има улога на колектор. Обично, нето-концентрацијата на примеси во подрачјата добиени со базната дифузија е многу поголема отколку нето-концентрацијата на примеси во колекторските подрачја.

Чекор 4: емитерска дифузија. На ист начин како и во претходниот чекор, најпрво се формира нова оксидна маска. Низ отворите на оваа маска се дифундираат примеси од n-тип (обично фосфор) со цел да се создаде емитерското подрачје на транзисторот и долната електрода на MOS-кондензаторот.

Малото n^+-подрачје во колекторското подрачје на транзисторот, добиено со емитерската дифузија, служи за да обезбеди омски (ненасочувачки) контакт меѓу алуминиумската металзациона мрежа, што ќе биде поставена во наредниот чекор, и колекторскиот слој во соодветната точка. Со завршувањето на четвртиот чекор е завршено и формирањето на елементите на колото.

Емитерската дифузија обично се изведува како дифузија од неограничен извор, но понекогаш и како двочекорна дифузија. На сликата 2.20 е претпоставен вториот случај. Нараснатиот оксиден слој (SiO_2) за време на вториот чекор (редистрибуцијата) ќе игра улога и на тенок диелектрик кај MOS-кондензаторот.



Сл.2.20. Основни чекори при фабрикацијата на биполарно монолитно интегрално коло

а) епитаксијален раст
б) изолациона дифузија
в) базна дифузија
г) емитерска дифузија
д) алуминиумска метализација

Чекор 5: алуминиумска метализација. Во овој чекор се реализира метализационата мрежа. Тоа се постигнува на тој начин што најпрвин, со помош на фотолитографска постапка, се отвора четврто множество на отвори на местата каде што треба да бидат направени контактите, потоа преку целата површина на плочката се нанесува тенок алуминиумски слој и на крајот по фотолитографски пат се отстрануваат несаканите алуминиумски површини.

Како илустрација на примената на планарната технологија, беше разгледан пример на биполарно коло (сл.1.2 и сл.2.20). На сличен начин се реализираат и униполарните интегрални кола со таа разлика што кај нив бројот на чекорите е обично помал. Имено, додека за добивање биполарно интегрално коло се потребни 6 до 7 фотолитографски постапки и четири дифузии,[1/] за добивање на NMOS или PMOS-интегралните кола се доволни една дифузија и четири фотолитографски постапки (над дифузијата, над тенкиот оксиден слој, над отворите на омските контакти и над метализацијата). Фабрикацијата на CMOS-колата е посложена и бара барем 6 фотолитографски постапки и 3 дифузии.

Сликата 2.20 претставува добра илустрација на примената на принципот на основен елемент. Имено, како што се гледа, при реализацијата на колото не е употребен ниту еден чекор повеќе од оние што се потребни за добивањето на npn-транзисторот.

1/ Освен фотолитографските постапки и дифузиите презентирани на сликата 2.20, кај стандардните биполарни интегрални кола се вршат една фотолитографска постапка и една дифузија повеќе за да се добие т.н. потколекторски слој, за кој овде не стана збор. Кај биполарните кола со MOS-кондензатори често се користи и уште една дополнителна фотолитографска постапка за означување на подрачјето на тенкиот оксид.

3. ОДБРАНИ ПОГЛАВЈА ОД ФИЗИЧКИТЕ ОСНОВИ НА МИКРОЕЛЕКТРОНИКАТА

Пред да се премине кон поконкретно разгледување на елементите на интегралните кола, корисно е да се воведат одредени поими и да се дефинираат одредени параметри кои се од пошироко значење во микроелектрониката. Исто така е корисно да се даде соодветна анализа на некои од основните полупроводнички структури.

Предмет на првата секција од оваа глава се теориските основи на дифузијата. Во рамките на оваа секција се воведува и важниот поим слојна отпорност. Во втората секција се разгледува зависноста на дебелината и на специфичната капацитивност на преодното подрачје на pn-спојот од примесниот профил и од погонските услови. Одредено внимание му е посветено и на електричното поле во преодното подрачје. Во третата секција е анализирана структурата метал-оксид-полупроводник. Конечно, во четвртата секција се проучува зависноста на струјното засилување на интегралниот npn-транзистор од неговите технолошки и геометриски параметри.

3.1. Теориски основи на дифузијата[1-6,17,18]

3.1.1. Фикови закони

Процесот на дифузијата е добро опишан со двата Фикови закона. Првиот Фиков закон гласи:

$$\bar{J} = -D \operatorname{grad} N \qquad (3.1.1)$$

каде што е: $\bar{J}$ - густина на протокот на честици (број на честиците по единица плоштина и единица време), D - дифузен коефициент и N - концентрација на честиците. Вториот Фиков закон се добива со израмнување брзината на промената на бројот на честиците во единичен волумен, $\frac{\partial N}{\partial t}$, и бројот на честиците што во единица време влегуваат во тој волумен, - div $\bar{J}$, т.е.

$$\frac{\partial N}{\partial t} = - \operatorname{div} \bar{J} \qquad (3.1.2)$$

Ако се претпостави дека дифузниот коефициент D е независен од положбата, од првиот и вториот Фиков закон се добива:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial z^2}\right) \qquad (3.1.3)$$

Кај планарната технологија, ако се игнорираат ефектите на рабовите на отворите од маските, дифузијата се сведува на еднодимензионален проблем. Така, вниманието може да се сконцентрира на решенијата на еднодимензионалната дифузна равенка:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} \qquad (3.1.4)$$

При анализите,обично,се претпоставува дека длабочината на навлегувањето на примесите е многу помала од дебелината на плочката, т.е. плочката се третира како полубесконечен кристал, $0<x<\infty$. Добиените резултати покажуваат дека оваа апроксимација, која во значителна мера го олеснува аналитичкото третирање на проблематиката, е практично секогаш оправдана, па во натамошниот текст таа ќе биде постојано подразбирана.

3.1.2. Дифузија од неограничен извор

Во случајот на дифузија од неограничен извор,дистрибуцијата N(x,t) на внесените примесни атоми во даден момент t од почетокот на процесот ќе биде она решение на парцијалната диференцијална равенка (3.1.4) што го задоволува почетниот услов:

$$N(x,0^-) = 0, \qquad 0 \leqslant x < \infty \qquad (3.1.5)$$

и граничните услови:

$$N(0,t) = N_o S(t) \qquad (3.1.6)$$

$$N(\infty,t) = 0 \qquad (3.1.7)$$

Овде S(t) е единичната отскочна функција. Условот (3.1.5) бара во плочката да не постојат примесни атоми пред почетокот на дифузијата, а (3.1.6) - површинската концентрација на примесните атоми да биде константна и еднаква на граничната растворливост N_o за сето време на дифузијата. Условот (3.1.7) е интуитивно разбирлив, т.е. концентрацијата на примеси бесконечно далеку од површината низ која се врши дифузијата мора да биде еднаква на нула за секој конечен момент $t>0$.

Парцијалната диференцијална равенка (3.1.4),при условите (3.1.5) до 3.1.7), најлесно се решава со помош на Лапласовата трансформација. Имено, примената на Лапласова трансформација во однос на времето ја трансформира равенката (3.1.4) во следнава обична диференцијална равенка:

$$s\mathcal{N}(x,s)-N(x,0^-)= D\,\frac{d^2\mathcal{N}(x,s)}{dx^2} \qquad (3.1.8)$$

Овде, x е независната променлива, $\mathcal{N}(x,s)$ е зависната променлива, а s се јавува како параметар. Со оглед на (3.1.5), диференцијалната равенка (3.1.8) е всушност хомогена, т.е. се сведува на:

$$\frac{d^2\mathcal{N}(x,s)}{dx^2} - \frac{s}{D}\,\mathcal{N}(x,s) = 0 \qquad (3.1.9)$$

па нејзиното општо решение гласи:

$$\mathcal{N}(x,s) = \mathcal{A}(s)\exp(-x\sqrt{\tfrac{s}{D}}) + \mathcal{B}(s)\exp(x\sqrt{\tfrac{s}{D}}) \qquad (3.1.10)$$

каде што $\mathcal{A}(s)$ и $\mathcal{B}(s)$ се константи зависни од параметарот s.

Бидејќи,согласно со (3.1.7), изразот N(x,t), а според тоа и неговата Лапласова трансформација $\mathcal{N}(x,s)$ мораат да останат конечни кога $x\to\infty$, ќе важи $\mathcal{B}(s)=0$, па (3.1.10) се сведува на:

$$\mathcal{N}(x,s) = \mathcal{A}(s)\exp(-x\sqrt{\tfrac{s}{D}}) \qquad (3.1.11)$$

Со оглед на тоа што, согласно со (3.1.6),е $\mathcal{N}(0,s)=N_o/s$, константата $\mathcal{A}(s)$ во (3.1.11) ќе биде еднаква на N_o/s, така што ќе важи:

$$\mathcal{N}(x,s) = \frac{N_o}{s}\exp(-x\sqrt{\tfrac{s}{D}}) \qquad (3.1.12)$$

Бараната дистрибуција N(x,t) ќе биде дадена со инверзната Лапласова трансформација од (3.1.12), т.е. со:

$$N(x,t) = \mathcal{L}^{-1}\{\mathcal{N}(x,s)\} = N_o\,\mathrm{erfc}\,\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \qquad (3.1.13)$$

што е идентично со (2.4.1).

Пример 3.1.

Во силициумска плочка се внесуваат атоми на бор по пат на дифузија од неограничен извор при температура од 950°C. Треба да се одреди бројот на примесните атоми што во текот на една секунда поминуваат низ 1 cm^2 од површината на плочката во моментот t_o=30 min од почетокот на дифузијата.

Решение

Од релациите (3.1.1) и (3.1.13) следува:

$$J(x,t) = -D\frac{\partial N}{\partial x} = -D\frac{\partial}{\partial x}(N_o\,\mathrm{erfc}\,\frac{x}{2\sqrt{Dt}})$$

$$= -D\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{2N_o}{\sqrt{\pi}}\int_{\frac{x}{2\sqrt{Dt}}}^{\infty}\exp(-y^2)dy\right) = \frac{N_o D}{\sqrt{\pi Dt}}\exp\frac{-x^2}{4Dt}$$

На површината од силициумот во моментот $t=t_o$ ќе важи:

$$J(0,t_o) = \frac{N_o D}{\sqrt{\pi D t_o}}$$

Согласно со табелата 2.1 е $N_o=4{,}5\times10^{20}cm^{-3}$ и $D = 1{,}6\times10^{-3}\mu m^2/h \doteq 4{,}44\times10^{-15}cm^2s^{-1}$, па се добива:

$$J(0,t_o)\doteq \frac{4{,}5\times10^{20}\times4{,}44\times10^{-15}}{\sqrt{\pi\times4{,}44\times10^{-15}\times1800}} = 3{,}98\times10^{11}\ \text{атоми}/cm^2s.$$

Пример 3.2.

Во силициумска плочка со концентрација на донорски атоми $N_{BC}= 5\times10^{15}cm^{-3}$ се врши дифузија на бор од неограничен

извор со времетраење t_p=30 min при 950°C. Колкава ќе биде длабочината x_j на така формираниот pn-спој?

Решение

Длабочината x_j на pn-спојот ќе ја задоволува равенката $N(x_j,t_p) = N_{BC}$, па, согласно со (3.1.13) (спореди со (2.4.4)), се добива:

$$x_j = 2\sqrt{Dt_p}\ \mathrm{erfc}^{(-1)}\ \frac{N_{BC}}{N_o}$$

Согласно со табелата 2.1, $N_o = 4{,}5\times10^{20}\,cm^{-3}$ и $D = 1{,}6\times10^{-3}\,\mu m^2/h$, па со помош на таблица на функцијата erfc(z) наоѓаме:

$$x_j = 2\sqrt{1{,}6\times10^{-3}\times0{,}5}\ \mathrm{erfc}^{(-1)}\frac{5\times10^{15}}{4{,}5\times10^{20}} \doteq 0{,}2\ \mu m$$

3.1.3. Дифузија од ограничен извор

Во случајот на дифузија од ограничен извор, примесниот профил N(x,t) во даден момент t од почетокот на процесот ќе биде она решение на парцијалната диференцијална равенка (3.1.4) што го задоволува почетниот услов:

$$N(x,0^-) = N_p(x), \qquad (3.1.14)$$

и граничните услови:

$$\left.\frac{\partial N(x,t)}{\partial x}\right|_{x=0} = 0 \qquad (3.1.15)$$

$$N(\infty,t) = 0 \qquad (3.1.16)$$

Овде $N_p(x)$ е дистрибуцијата на внесените (предепонираните) примесни атоми во површинскиот слој на плочката пред почетокот на дифузијата. Согласно со првиот Фиков закон, условот (3.1.15) всушност бара протокот на примесните атоми низ површината на плочката во секој момент t да биде еднаков на нула (во текот на дифузијата нема внесување на примесни атоми ниту пак се

дозволува претходно внесените примесни атоми да излегуваат надвор од плочката).

Парцијалната диференцијална равенка (3.1.4) при условите (3.1.14) до (3.1.16) може да се реши по методот на сепарација на варијаблите. Како резултат се добива изразот:

$$N(x,t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi Dt}}\int_0^\infty N_p(y)\left[\exp\frac{-(x-y)^2}{4Dt} + \exp\frac{-(x+y)^2}{4Dt}\right]dy \qquad (3.1.17)$$

Јасно, обликот на профилот N(x,t) ќе зависи од дистрибуцијата $N_p(x)$ на претходно депонираните примесни атоми. За да се изрази N(x,t) на вообичаен начин (не во облик на интеграл) потребно е во (3.1.17) да се внесе соодветниот израз за $N_p(x)$ и да се изврши интеграцијата. Меѓутоа, математичкиот израз на дистрибуцијата $N_p(x)$ најчесто или не е познат или е таков што не овозможува аналитичко решавање на интегралот во (3.1.17). Поради ова, обично се прибегнува кон апроксимација на дистрибуцијата $N_p(x)$ со едноставна функција која овозможува аналитичко решавање на интегралот во (3.1.17) и истовремено доведува до релативно едноставен израз за примесниот профил N(x,t).

Интегрирањето на (3.1.17) е наједноставно ако се претпостави дека сите предепонирани атоми се сконцентрирани на површината, т.е. ако се земе дека е

$$N_p(x) = Q\delta(x) \qquad (3.1.18)$$

каде што $\delta(x)$ е единична делта функција поставена во координатниот почеток, а Q е плоштинската густина на предепонираните атоми. Ако (3.1.18) се внесе во (3.1.17), веднаш се добива:

$$N(x,t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}}\exp\frac{-x^2}{4Dt} \qquad (3.1.19)$$

Добиениот израз е навистина едноставен - што претставува добра страна на оваа апроксимација. Меѓутоа, тој го опишува задоволувачки точно стварниот примесен профил само ако дебелината на предепонираниот слој е занемарливо мала во однос на карактеристичната должина $\sqrt{Dt}$ на дифузијата.

Подобри резултати се добиваат ако се примени степ-апроксимацијата:

$$N_p(x) = \begin{cases} N_{po}, & \text{за } 0<x<h \\ 0, & \text{за } x>h \end{cases} \qquad (3.1.20)$$

каде што N_{po} и h се константи што го задоволуваат барањето плоштината под (3.1.20) да биде еднаква на плоштинската густина Q на предепонираните примесни атоми, т.е.

$$\int_0^\infty N_p(x)dx = N_{po}h = Q \qquad (3.1.21)$$

Тогаш изразот (3.1.17) се сведува на:

$$N(x,t) = \frac{N_{po}}{2}\left[\operatorname{erf}\frac{h-x}{2\sqrt{Dt}} + \operatorname{erf}\frac{h+x}{2\sqrt{Dt}}\right] \qquad (3.1.22)$$

каде што erf(z) е функцијата на грешка, т.е.

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^z \exp(-y)^2\,dy = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_z^\infty \exp(-y^2)dy$$
$$= 1 - \operatorname{erfc}(z) \qquad (3.1.23)$$

Често, уште подобри резултати се добиваат ако се примени Гаусовата апроксимација:

$$N_p(x) = N_{po}\exp\frac{-x^2}{4m} \qquad (3.1.24)$$

каде што константите N_{po} и m го задоволуваат барањето интегралот од (3.1.24) да биде еднаков на плоштинската густина Q на предепонираните примесни атоми, т.е.

$$\int_0^\infty N_p(x)dx = N_{po}\sqrt{\pi m} = Q \qquad (3.1.25)$$

Внесувајќи го (3.1.24) во (3.1.17) и користејќи се со

идентитетот:

$$\int_0^\infty \operatorname{ch}(bx)\exp(-a^2x^2)dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2a}\exp\frac{b^2}{4a^2} \qquad (3.1.26)$$

се добиња:

$$N(x,t) = N_{po}\left(\frac{m}{m+Dt}\right)^{1/2}\exp\frac{-x^2}{4(m+Dt)} \qquad (3.1.27)$$

3.1.4. Двочекорна дифузија

Како што беше наведено во секцијата 2.4, под двочекорна дифузија се подразбира постапка од две последователни дифузии од кои првата е дифузија од неограничен извор и служи за остварување на предепозицијата, а втората е дифузија од ограничен извор и служи за редистрибуција на предепонираните примеси кон длабочината на плочката. Првиот чекор на двочекорната дифузија е познат како чекор на предепозицијата, а вториот - како чекор на редистрибуцијата. Чекорот на предепозицијата обично се врши при температура од околу 950°C. Чекорот на редистрибуцијата се врши при повисока температура отколку чекорот на предепозицијата, а како типична температура се јавува 1150°C. Според тоа, согласно со (3.1.17), примесниот профил на двочекорната дифузија ќе биде даден со изразот:

$$N(x,t_p,t_d) = \frac{1}{2\sqrt{\pi D_d t_d}}\int_0^\infty N_p(y,t_p)\left[\exp\frac{-(x-y)^2}{4D_d t_d} + \exp\frac{-(x+y)^2}{4D_d t_d}\right]dy \qquad (3.1.28)$$

каде што $N_p(x,t_p)$ е дистрибуцијата на примесите по завршувањето на предепозицијата или, што е исто, пред почетокот на редистрибуцијата, т.е.

$$N_p(x,t_p) = N_o\operatorname{erfc}\frac{x}{2\sqrt{D_p t_p}} \qquad (3.1.29)$$

Во горните изрази t_p е времетраење на предепозицијата, а t_d - времетраење на редистрибуцијата. D_p и D_d се дифузни коефициенти на примесните атоми при температурата на предепозицијата, односно при температурата на редистрибуцијата, респективно.

Површинската густина на примесните атоми внесени во плочката во текот на предепозицијата изнесува:

$$Q = \int_0^\infty N_p(x,t_p)dx = 2N_o\left(\frac{D_p t_p}{\pi}\right)^{1/2} \qquad (3.1.30)$$

што лесно се добива ако се има предвид дека е:

$$\int_0^\infty \mathrm{erfc}(x)dx = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \qquad (3.1.31)$$

За жал, кога (3.1.29) ќе се внесе во (3.1.28), профилот $N(x,t_p,t_d)$ не се сведува на некоја елементарна или друга едноставна функција, како што би било пожелно, туку на релативно сложениот израз:

$$N(x,t_p,t_d) = \frac{2N_o}{\sqrt{\pi}} \int_{\sqrt{z}}^\infty \exp(-y^2)\,\mathrm{erf}(ry)dy \qquad (3.1.32)$$

каде што е:

$$r = \left(\frac{D_p t_p}{D_d t_d}\right)^{1/2} \qquad (3.1.33)$$

$$z = \frac{x^2}{4(D_p t_p + D_d t_d)} \qquad (3.1.34)$$

Изразот (3.1.32) е егзактен, т.е. прецизно го опишува примесниот профил на двочекорната дифузија. Меѓутоа, поради релативната сложеност, во практиката најчесто се избегнува неговата примена, т.е., како што веќе споменавме, се прибегнува кон такви апроксимации на $N_p(x,t_p)$ кои овозможуваат аналитичко интегрирање на (3.1.28) и резултираат во релативно едноставни апроксимативни изрази на профилот на двочекорната дифузија.

Решението (3.1.32) може да се искористи за да се добие изразот за површинската концентрација N_s кај двочекорната дифузија. Имено, со оглед на

$$N_s = N(0,t_p,t_d) = \frac{2N_o}{\sqrt{\pi}} \int_0^\infty \exp(-y^2)\,\mathrm{erf}(ry)dy \qquad (3.1.35)$$

се добива:

$$\frac{dN_s}{dr} = \frac{4N_o}{\pi} \int_0^\infty y\exp\left[-y^2(1+r^2)\right] dy = \frac{2N_o}{\pi(1+r^2)} \qquad (3.1.37)$$

од каде што следува:

$$N_s = \frac{2N_o}{\pi} \int_0^r \frac{dy}{1+y^2} + C$$

Интеграционата константа C е еднаква на нула бидејќи при r=0 мора да важи $N_s=0$. Според тоа:

$$N_s = \frac{2N_o}{\pi}\,\mathrm{arctg}(r) = \frac{2N_o}{\pi}\,\mathrm{arctg}\left(\frac{D_p t_p}{D_d t_d}\right)^{1/2} \qquad (3.1.38)$$

Пример 3.3.

Колкава ќе биде површинската густина на предепонираните атоми на бор во случајот на получасовна предепозиција при температурата од 950°C?

Решение

Според табелата 2.1, за даденият случај е $N_o = 4{,}5\times10^{20}\,cm^{-3}$ и $D_p = 1{,}6\times10^{-3}\,\mu m^2/h$, па се добива:

$$Q = 2N_o\left(\frac{D_p t_p}{\pi}\right)^{1/2} = 2\times4{,}5\times10^{20}\left(\frac{1{,}6\times10^{-3}\times10^{-8}\times0{,}5}{\pi}\right)^{1/2} \doteq 1{,}44\times10^{15}\,cm^{-2}$$

Пример 3.4.

Во силициумска плочка е извршена двочекорна дифузија на бор. Предепозицијата се вршела при температура од 950°C и траела $t_p = 0{,}5$ h, а редистрибуцијата се вршела при температура од 1150°C и траела $t_d = 2$ h. Треба да се одреди површинската концентрација N_s.

Решение

Согласно со табелата 2.1, вредностите на дифузниот коефициент на бор при температурата на предепозицијата (950°C) и редис-

трибуцијата (1150°C) изнесуваат $D_p = 1{,}6\text{x}10^{-3}\ \mu m^2/h$ и $D_d = 1{,}6\text{x}10^{-1}\ \mu m^2/h$. Граничната растворливост на бор при температурата на предепозицијата е $N_o = 4{,}5\text{x}10^{20} cm^{-3}$. Според тоа, следува:

$$N_s = \frac{2N_o}{\pi} \operatorname{arctg}\left(\frac{D_p t_p}{D_d t_d}\right)^{1/2} = \frac{2\text{x}4{,}5\text{x}10^{20}}{\pi} \operatorname{arctg}\left(\frac{1{,}6\text{x}10^{-3}\text{x}0{,}5}{1{,}6\text{x}10^{-1}\text{x}2}\right)^{1/2}$$

$$\triangleq 1{,}43\text{x}10^{19} cm^{-3}$$

Апроксимација на предепозицијата со делта-функција Во случај на двочекорна дифузија, плоштинската густина на предепонираните примесни атоми Q е дадена со изразот (3.1.30). Според тоа, ако дистрибуцијата на предепонираните атоми $N_p(x,t_p)$ се апроксимира со делта-функција, за примесниот профил на двочекорната дифузија се добива - согласно со (3.1.19) - следниов апроксимативен израз:

$$N(x,t_p,t_d) = \frac{2N_o}{\pi} \left(\frac{D_p t_p}{D_d t_d}\right)^{1/2} \exp \frac{-x^2}{4D_d t_d} \qquad (3.1.39)$$

Овој израз го опишува задоволувачки точно стварниот примесен профил (3.1.32) само ако е $\sqrt{D_d t_d} >> \sqrt{D_p t_p}$, т.е. ако карактеристичната должина на чекорот на редистрибуцијата е многу поголема од карактеристичната должина на чекорот на предепозицијата - што, за среќа, во практиката е честопати случај.

При $\sqrt{D_d t_d} < \sqrt{D_p t_p}$ изразот (3.1.39) дава апсурдни резултати. Треба, на пример, да се забележи дека според него површинската концентрација $N_s = N(0,t_p,t_d)$ се стреми кон бесконечност кога $t_d \to 0$, иако стварната гранична вредност е N_o.

Пример 3.5.

Во силициумска плочка со концентрација на донорски атоми $N_{BC} = 5\text{x}10^{15} cm^{-3}$ се врши двочекорна дифузија на бор. Предепозицијата се врши при температура од 950°C и трае 30 min, а редистрибуцијата - при температура од 1150°C и трае 2 h. Треба да се одреди длабочината x_j на формираниот pn-спој.

Решение

Длабочината x_j на формираниот pn-спој по завршувањето на дочекорната дифузија ќе биде решение на равенката:

$$N(x_j,t_p,t_d) = N_{BC}$$

каде што $N(x,t_p,t_d)$ е примесниот профил на двочекорната дифузија.

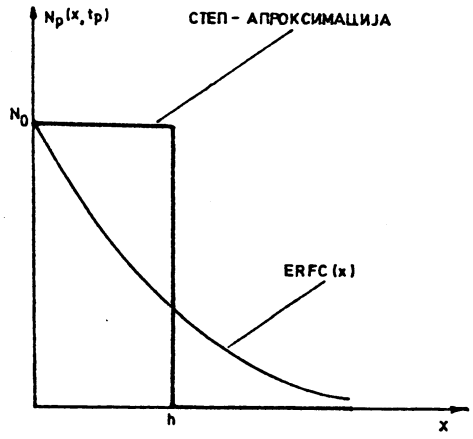
Согласно со табелата 2.1, граничната растворливост и дифузниот коефициент на бор при 950°C изнесува $N_o = 4{,}5\text{x}10^{20} cm^{-3}$ и $D_p = 1{,}6\text{x}10^{-3}\ \mu m^2/h$. Имајќи предвид дека е $t_p = 0{,}5$ h наоѓаме $\sqrt{D_p t_p} \triangleq 2{,}8\text{x}10^{-2}\ \mu m$. Во текот на чекорот на редистрибуцијата температурата изнесува 1150°C, па, согласно со табелата 2.1, $D_d = 1{,}6\text{x}10^{-1}\ \mu m^2/h$. Имајќи предвид дека е $t_d = 2$ h, наоѓаме $\sqrt{D_d t_d} \triangleq 5{,}7\text{x}10^{-1}\ \mu m$. Бидејќи за дадениот случај е $\sqrt{D_d t_d} >> \sqrt{D_p t_p}$, примесниот профил на двочекорната дифузија ќе биде добро апроксимиран со изразот (3.1.39), па добиваме:

$$x_j = 2\sqrt{D_d t_d}\left\{\ln\left[\frac{2N_o}{\pi N_{BC}} \left(\frac{D_p t_p}{D_d t_d}\right)^{1/2}\right]\right\}^{1/2} \triangleq 3{,}21\ \mu m$$

Степ-апроксимација на предепозицијата Подобри резултати и точна вредност за површинската концентрација при $t_d \to 0$ се добиваат ако за дистрибуцијата $N_p(x,t_p)$ на предепонираните примесни атоми се примени апроксимацијата (3.1.20) со $N_{po} = N_o$ (сл.3.1). Тогаш примесниот профил на двочекорната дифузија - согласно со (3.1.21), (3.1.22) и (3.1.30) - ќе биде даден со апроксимативниот израз:

$$N(x,t_p,t_d) = \frac{N_o}{2}\left[\operatorname{erf} \frac{2\sqrt{\frac{D_p t_p}{\pi}} - x}{2\sqrt{D_d t_d}} + \operatorname{erf} \frac{2\sqrt{\frac{D_p t_p}{\pi}} + x}{2\sqrt{D_d t_d}}\right] \qquad (3.1.40)$$

Очигледно, добиениот израз е значително посложен од изразот (3.1.39). Токму поради тоа, неговата примена во практиката не е така честа како примената на изразот (3.1.39).



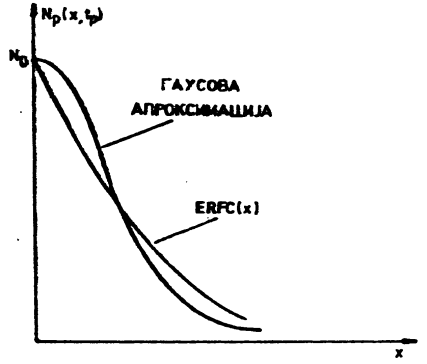
Сл.3.1. Степ-апроксимација на диструбицијата на предепонираните примесни атоми кај двочекорната дифузија

Апроксимација на предепозицијата со Гаусова функција Ако за дистрибуцијата $N_p(x,t_p)$ на предепонираните примесни атоми се примени апроксимацијата (3.1.24) со $N_{po} = N_o$ (сл.3.2), примесниот профил на двочекорната дифузија - согласно (3.1.25), (3.1.27) и (3.1.30) - ќе биде даден со следниов апроксимативен израз:

$$N(x,t_p t_d) = \frac{2N_o}{\pi}\left(\frac{D_p t_p}{D_d t_d+(4/\pi^2)D_p t_p}\right)^{1/2}\exp\frac{-x^2}{4\left[D_d t_d+(4/\pi^2)D_p t_p\right]} \qquad (3.1.41)$$

Со оглед на тоа што Гаусовата апроксимација на предепонираниот профил е посоодветна отколку делта-апроксимацијата односно степ-апроксимацијата, изразот (3.1.41) претставува подобра апроксимација на профилот на двочекорната дифузија (3.1.32) отколку изразите (3.1.39) и (3.1.40). Јасно, изразот (3.1.41), како и изразот (3.1.40), дава точна вредност за површинската концентрација на примесните атоми при $t_d \to 0$.

Треба да се забележи дека изразот (3.1.41) е идентичен по формата со едноставниот израз (3.1.39), со таа разлика што овде наместо $D_d t_d$ се става $D_d t_d + (4/\pi^2)D_p t_p$. Според тоа, сите погодности во примената што ги овозможува едноставноста на изразот (3.1.39) ги нуди и изразот (3.1.41).



Сл.3.2. Гаусова апроксимација на дистрибуцијата на предепонираните примесни атоми кај двочекорната дифузија

3.1.5. Дифузија при временски променлив дифузен коефициент

Во текот на изготвувањето на интегралното коло, силициумската плочка се подложува на повеќе високотемпературни постапки (постапки на дифузија и термичка оксидација), т.е. минува низ серија од подолги и пократки високотемпературни временски интервали со повисоки и пониски температури. Поради ова, примесниот профил на дадена дифузија не може да се смета како конечен сè до завршувањето на последната високотемпературна постапка. Варирањето на температурата при изработката на интегралното коло е проследено со варирање на дифузните коефициенти на примесните атоми, па е разбирливо што се поставува принципиелното прашање за начинот на определување на примесниот профил во услови на временски променлив дифузен коефициент.

Тргнувајќи од Фиковите закони, лесно се заклучува дека парцијалната диференцијална равенка (3.1.4) важи и за случајот кога дифузниот коефициент е функција од времето, т.е. кога е $D = D(t)$. Ако левата и десната страна на (3.1.4) се поделат со D, се добива:

$$\frac{1}{D}\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} \qquad (3.1.42)$$

што може да се напише и во обликот:

$$\frac{\partial N}{\partial\left(\int_0^t D(y)dy\right)} = \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} \qquad (3.1.43)$$

Во посебниот случај кога дифузниот коефициент е независен од времето, изразот (3.1.43) се сведува на:

$$\frac{\partial N}{\partial (Dt)} = \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} \qquad (3.1.44)$$

Компарирајќи ги изразите (3.1.43) и (3.1.44) станува очигледно дека примесниот профил за даден временски променлив дифузен коефициент и дадени почетни и гранични услови ќе се добие ако во соодветниот израз за случајот на константен дифузен коефициент продуктот Dt се замени со

$$\int_0^t D(y)dy \ .$$

Определувањето на интегралот $\int_0^t D(y)dy$ обично се сведува на определување на сумата $\sum_i D_i t_i$, каде што D_i е вредноста што дифузниот коефициент ја има во текот на високотемпературниот временски интервал t_i.

Пример 3.6.

Кај некое биполарно коло базната и емитерската дифузија се реализираат како двочекорни. Притоа, како дифузанти се користат бор и фосфор. Предепозицијата на базната дифузија се врши при температура од 950°C и трае t_1 = 0,5 h, а редистрибуцијата при температура од 1150°C и трае t_2 = 2 h. Предепозицијата на емитерската дифузија се врши при температура од 950°C и трае t_3 = 0,5 h, а редистрибуцијата - при температура од 1100°C и трае t_4 = 2 h. Концентрацијата на донорски атоми во епитаксијалниот слој изнесува $N_{BC} = 5x10^{15}cm^{-3}$. Треба да се одреди за колкава вредност ќе се промени длабочината на базната дифузија поради последователната примена на емитерската дифузија.

Решение

Од табелата 2.1. се гледа дека граничната растворливост на бор при температурата на предепозицијата (950°C) и вредностите на неговиот дифузен коефициент при температурите на првиот и вториот чекор на базната дифузија, односно првиот и вториот чекор на емитерската дифузија изнесуваат респективно:

$N_o = 4,5x10^{20}cm^{-3}$

$D_1 = 1,6x10^{-3}\mu m^2/h,$

$D_2 = 1,6x10^{-1}\mu m^2/h,$

$D_3 = 1,6x10^{-3}\mu m^2/h,$

$D_4 = 5,8x10^{-2}\mu m^2/h.$

Согласно со примерот 3.5, за длабочината x_{j1} на базната дифузија, пред почетокот на емитерската дифузија, се добива:

$$x_{j1} = 2\sqrt{D_2 t_2}\{\ell n\,[\frac{2N_o}{\pi N_{BC}}(\frac{D_1 t_1}{D_2 t_2})^{1/2}]\}^{1/2} \doteq 3,21\ \mu m$$

Од друга страна профилот на базната дифузија по завршувањето на емитерската дифузија ќе биде даден со изразот:

$$N(x,t_1,t_d) = \frac{2N_o}{\pi}(\frac{D_1 t_1}{\int_0^{t_d} D(y)dy})^{1/2}\exp\frac{-x^2}{4\int_0^{t_d} D(y)dy}$$

каде што е:

$$\int_0^{t_d} D(y)dy \doteq D_2t_2 + D_3t_3 + D_4t_4$$

Според тоа важи:

$$N(x,t_1,t_d) \doteq \frac{2N_o}{\pi}\left(\frac{D_1 t_1}{D_2t_2+D_3t_3+D_4t_4}\right)^{1/2}\exp\frac{-x^2}{4(D_2t_2+D_3t_3+D_4t_4)}$$

Длабочината x_{j2} на базната дифузија по завршувањето на емитерската дифузија ќе биде решение на равенката:

$$N(x_{j2},t_1,t_2) = N_{BC}$$

па следува:

$$x_{j2} \doteq 2\sqrt{D_2t_2+D_3t_3+D_4t_4}\ \{\ln[\frac{2N_o}{\pi N_{BC}}(\frac{D_1t_1}{D_2t_2+D_3t_3+D_4t_4})^{1/2}]\}^{1/2}$$

$$\doteq 3,69\ \mu m$$

Значи, поради емитерската дифузија длабочината на базната дифузија ќе се зголеми за:

$$\Delta x_j = x_{j2} - x_{j1} \doteq 0,48\ \mu m$$

Пример 3.7.

Колкава процентуална промена на површинската концентрација на акцепторските атоми внесени со базната дифузија ќе биде предизвикана со изведувањето на емитерската дифузија во случајот даден со примерот 3.6.?

Решение

Согласно со (3.1.38) и примерот 3.4, површинската концентрација на акцепторските атоми пред почетокот на емитерската дифузија ќе биде еднаква на:

$$N_{s1} = \frac{2N_o}{\pi}\ \mathrm{arctg}(\frac{D_1t_1}{D_2t_2})^{1/2} \doteq 1,43\times10^{19}cm^{-3}$$

Површинската концентрација на акцепторските атоми по завршувањето на емитерската дифузија ќе изнесува:

$$N_{s2} = \frac{2N_o}{\pi}\ \mathrm{arctg}(\frac{D_1t_1}{\int_o^{t_d} D(y)dy})^{1/2} \doteq \frac{2N_o}{\pi}\ \mathrm{arctg}(\frac{D_1t_1}{D_2t_2+D_3t_3+D_4t_4})^{1/2}$$

$$\doteq 1,23\times10^{19}cm^{-3}$$

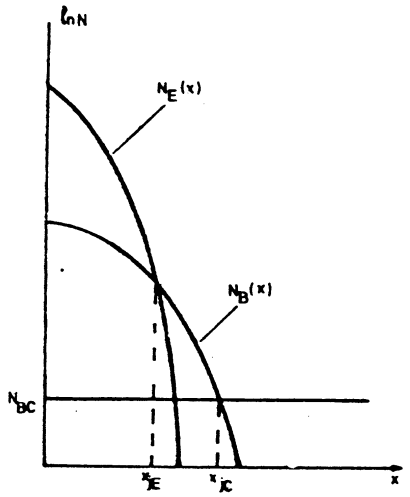
Според тоа:

$$\frac{\Delta N_s}{N_s}\ \% = \frac{N_{s2}-N_{s1}}{N_{s1}} \times 100 \doteq -13,99\%$$

3.1.6. Положба на емитерскиот и колекторскиот pn-спој кај npn-транзисторот

Под положба на даден pn-спој се подразбира положбата на неговата металуршка граница. По дефиниција, металуршката граница се наоѓа таму каде што нето-примесната концентрација е еднаква на нула. Според тоа, ако со N_{BC} се означи нето-донорската концентрација во епитаксијалниот слој, со $N_B(x)$ - примесниот профил на базната дифузија и со $N_E(x)$ - примесниот профил на емитерската дифузија (сл.3.3), положбите на емитерскиот и колекторскиот pn-спој кај npn-транзисторот ќе бидат решенија на равенката:

$$N_B(x) = N_E(x) + N_{BC} \qquad (3.1.45)$$



Сл.3.3. Примесни профили кај npn-транзисторот

Притоа, решението со помала вредност ќе одговара на положбата на емитерскиот pn-спој, а решението со поголема вредност на положбата на колекторскиот pn-спој.

Кај најголемиот број практични изведби, во близината на емитерскиот pn-спој е $N_{BC} \ll N_E$, а во близината на колекторскиот pn-спој важи $N_E \ll N_{BC}$, па положбите на емитерскиот и колекторскиот pn-спој, т.е. x_{jE} и x_{jC}, се приближно одредени со изразите:

$$N_B(x_{jE}) = N_E(x_{jE}) \qquad (3.1.46)$$

$$N_B(x_{jC}) = N_{BC} \qquad (3.1.47)$$

Пример 3.8.

Базата и емитерот на некој npn-транзистор се реализирани како двочекорни дифузии на бор и фосфор во епитаксијална подлога со нето-донорска концентрација $N_{BC} = 5x10^{15}cm^{-3}$. Предепозицијата на базната дифузија е вршена при температура од 950°C и за време од $t_1 = 0,5$ h, а редистрибуцијата - при температура од 1150°C и за време од $t_2 = 2$ h. Предепозицијата на емитерската дифузија е вршена при температура од 950°C и за време од $t_3 = 0,5$ h, а редистрибуцијата - при температура од 1100°C и за време од $t_4 = 2$ h. Треба да се одреди длабочината на емитерскиот pn-спој.

Решение

Во дадениот случај профилите на базната и емитерската дифузија можат да бидат апроксимирани со изразите:

$$N_B(x) = \frac{2N_{oB}}{\pi}\left(\frac{D_{1B}t_1}{D_{2B}t_2+D_{3B}t_3+D_{4B}t_4}\right)^{1/2}\exp\frac{-x^2}{4(D_{2B}t_2+D_{3B}t_3+D_{4B}t_4)}$$

$$N_E(x) = \frac{2N_{oP}}{\pi}\left(\frac{D_{1P}t_3}{D_{2P}t_4}\right)^{1/2}\exp\frac{-x^2}{4D_{2P}t_4}$$

Овде, N_{oB} е граничната растворливост на бор при температурата на првиот чекор на базната дифузија. Величините D_{1B}, D_{2B}, D_{3B} и D_{4B} се дифузните коефициенти на бор при температурите на првиот и вториот чекор на базната дифузија, односно првиот и вториот чекор на емитерската дифузија, респективно. N_{oP} е граничната растворливост на фосфор при температурата на првиот чекор на емитерската дифузија. Величините D_{1P} и D_{2P} се дифузните коефициенти на фосфор при температурите на првиот и вториот чекор на емитерската дифузија, респективно. Според табелата 2.1: $N_{oB} = 4,5x10^{20}cm^{-3}$, $D_{1B} = 1,6x10^{-3}\mu m^2/h$, $D_{2B} = 1,6x10^{-1}\mu m^2/h$, $D_{3B} = 1,6x10^{-3}\mu m^2/h$, $D_{4B} = 5,8x10^{-2}\mu m^2/h$, $N_{oP} = 8,5x10^{20}cm^{-3}$, $D_{1P} = 1,7x10^{-3}\mu m^2/h$, $D_{2P} = 7,3x10^{-2}\mu m^2/h$.

Израмнувајќи ги десните страни на горните изрази, за длабочината на емитерскиот pn-спој - согласно (3.1.46) - добиваме:

$$x_{jE} \doteq 1,032\ \mu m$$

Притоа е:

$$N_E(x_{jE}) \doteq 6,7x10^{18}cm^{-3}$$

Со оглед на $N_E(x_{jE}) >> N_{BC}$, добиената вредност за x_{jE} може да се смета како точна.

3.1.7. Слојна отпорност [1, 3-6]

Поим за слојна отпорност Слојната отпорност се јавува како еден од поважните и често употребувани параметри во интегралната техника. Се користи како квантитативна карактеристика на даден слој во поглед на неговата способност за проведување на електрична струја. Дефинирана е со изразот:

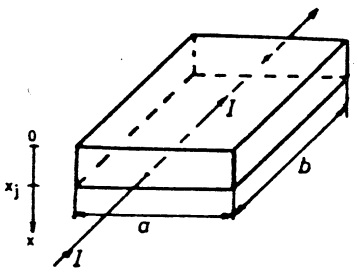
$$R_s = \frac{1}{x_j\bar{\sigma}} \qquad (3.1.48)$$

каде што x_j е дебелината, а

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{x_j}\int_0^{x_j}\sigma dx \qquad (3.1.49)$$

просечната специфична проводност на слојот. Физичкото значење на слојната отпорност може да се согледа ако се посматра прикажаниот на сликата 3.4. правоаголен извадок од некој слој. Отпорноста на извадокот во назначената насока на течење на струјата ќе биде дадена со изразот:

$$R = \frac{1}{G} = \frac{1}{\bar{\sigma}\frac{x_j a}{b}} = R_s\frac{b}{a} \qquad (3.1.50)$$



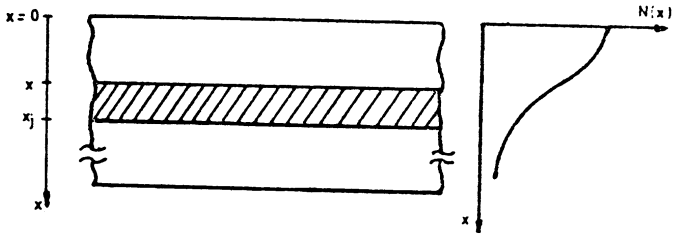
Сл.3.4. Извадок од слој

па произлегува дека за извадок со квадратна форма (b=a) ќе важи $R = R_s$. Според тоа, слојната отпорност може да се дефинира и како надолжна отпорност на слој со квадратна конфигурација. Токму затоа, слојната отпорност во практиката редовно се изразува во Ω/□ (ома по квадрат) иако нејзината единица е всушност само Ω.

Ирвинови криви Ирвиновите криви претставуваат графички приказ на зависноста меѓу просечната специфична проводност $\bar{\sigma}$ на слој добиен по пат на дифузија на примеси во униформно легирана подлога од спротивен тип проводност и површинската концентрација на дифундираните примеси, а служат за одредување на слојните отпорности на така добиени слоеви. Се претпоставува дека дифундираните примеси се распределени според Гаусовата функција или според комплементарната функција на грешка. Притоа е извршено обопштување во смисла на тоа што како слој се посматра просторот меѓу рамнината на pn-спојот x_j и некоја рамнина на произволно растојание $x < x_j$ од површината на подлогата, како што е назначено на сликата 3.5. Се разбира, во овој случај релациите (3.1.48) и (3.1.49) примаат облик:

$$R_s = \frac{1}{(x_j - x)\bar{\sigma}} \qquad (3.1.51)$$

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{x_j - x}\int_x^{x_j} \sigma\, dx \qquad (3.1.52)$$

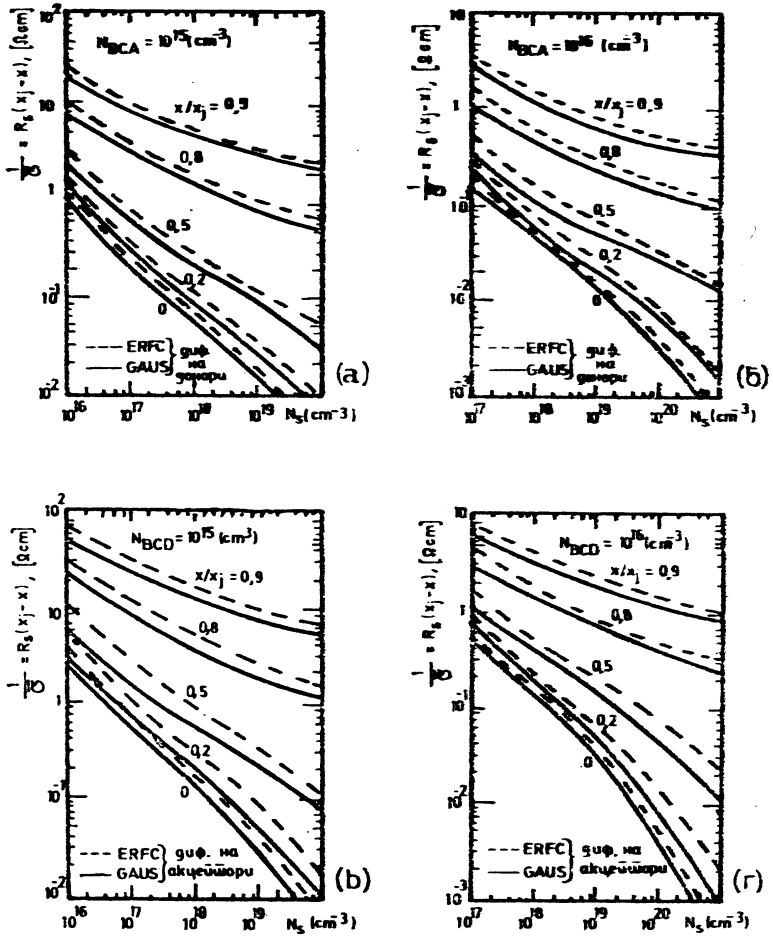


Сл.3.5. Обопштување на поимот слој

Ирвиновите криви се прикажани на сликата 3.6. До нив дошол J. C. Ирвин по нумерички пат, служејќи се со релацијата (3.1.52), при што специфичната проводност ја апроксимирал со изразот:

$$\sigma(x) = q\mu(x)N_n(x) \qquad (3.1.53)$$

каде што $q = 1{,}60\times10^{-19}$C е полнежот на електронот, μ е подвижноста на основните носители на електрицитет, а N_n е нето-примесната концентрација, т.е. $N_n = |N_a - N_d|$. Подвижноста μ е функција од



Сл.3.6. Ирвинови криви

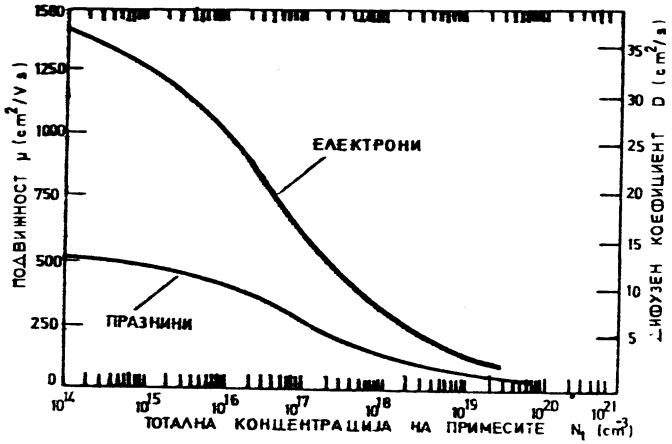
а) дифузија на донори во хомогена p-подлога со акцепторска концентрација $N_{BCA} = 10^{15}$cm^{-3}

б) дифузија на донори во хомогена p-подлога со акцепторска концентрација $N_{BCA} = 10^{16}$cm^{-3}

в) дифузија на акцептори во хомогена n-подлога со донорска концентрација $N_{BCD} = 10^{15}$cm^{-3}

г) дифузија на акцептори во хомогена n-подлога со донорска концентрација $N_{BCD} = 10^{16}$cm^{-3}

длабочината x, бидејќи е зависна од тоталната примесна концентрација $N_t = N_a + N_d$. Зависноста на μ од N_t е прикажана графички на сликата 3.7.



Сл.3.7. Подвижност и дифузен коефициент на електроните, односно празнините во функција од тоталната примесна концентрација при температура од 300 К.

Како што се гледа од сликата 3.6, Ирвиновите криви се цртани во правоаголен координатен систем на чија апсциса е нанесена површинската концентрација на дифундираните примеси (во cm^{-3}), а на ординатата - реципрочната вредност од просечната специфична проводност на слојот (во Ωcm). Во улога на параметар се јавува односот x/x_j кој, според сликата 3.5, варира меѓу 0 и 1. Дадени се криви за дифузија на донори во p-подлога со рамномерна концентрација на акцепторски атоми $N_{BCA} = 10^{15} cm^{-3}$, односно $N_{BCA} = 10^{16} cm^{-3}$ (сл.3.6-а и 3.6-б), како и криви за дифузија на акцептори во n-подлогата со рамномерна концентрација на донорски атоми $N_{BCD} = 10^{15} cm^{-3}$, односно $N_{BCD} = 10^{16} cm^{-3}$ (сл.3.6-в и 3.6-г). Кривите означени со полна линија важат за дифузија според Гаусовата расподелба, а оние означени со испрекината линија се однесуваат на дифузија според комплементарната функција на грешка.

Треба да се истакне дека Ирвиновите криви можат да послужат за одредување на параметрите на базата на монолитниот npn-транзистор, кај кој базата се дифундира во епитаксијален n-слој со константна концентрација на донорски примеси. Тие, меѓутоа, не можат да се употребат за одредување на параметрите на емитерот бидејќи p-подрачјето на базата во кое се врши емитерската дифузија е нехомогено во поглед на концентрацијата на примеси.

Во техничката литература се среќаваат и други начини на прикажување на Ирвиновите криви, како и дијаграми кои претставуваат всушност само изводи од Ирвиновите резултати. Така, на пример, приказот на сликата 3.8 се однесува на Ирвиновите криви карактеризирани со $x/x_j = 0$, и тоа за случајот на Гаусова дифузија на акцепторски примеси. Како параметар се јавува концентрацијата на примеси во подлогата, N_{BCD}. Во споредба со приказите на сликата 3.6, овде улогата на координатните оски е променета. Имено, како независна варијабла се јавува реципрочната вредност на просечната специфична проводност на слојот, а како зависна - површинската концентрација на дифундираните примеси.

Пример 3.9.

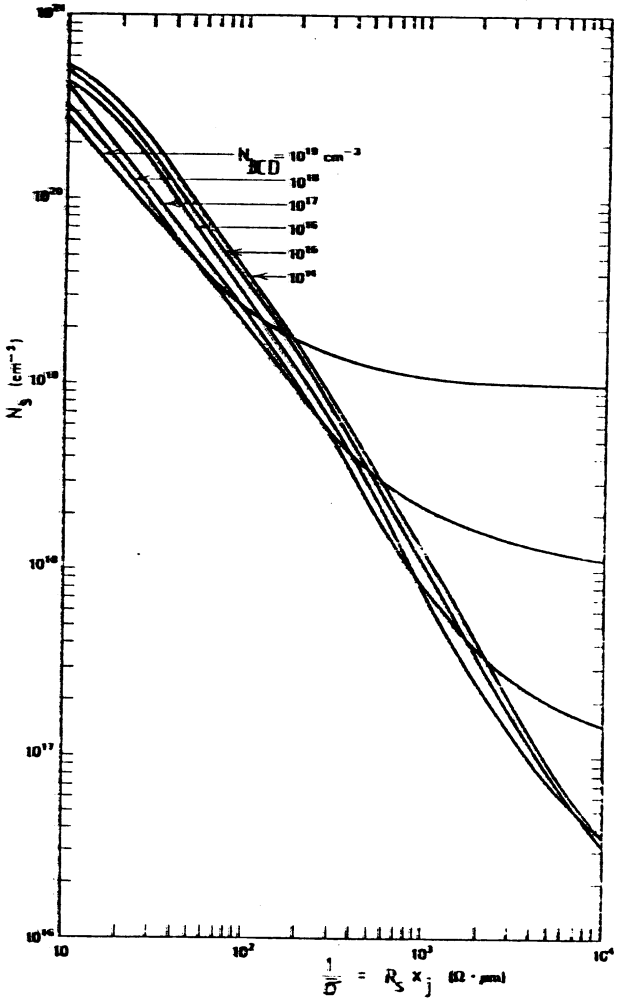
Базата на даден npn-транзистор се добива со Гаусова дифузија на акцепторски примеси во епитаксијален слој со концентрација на донорски атоми $N_{BCD} = 10^{15} cm^{-3}$. Длабочината на реализираниот pn-спој колектор-база изнесува $x_j = 2$ μm. Површинската концентрација на акцепторите е $N_s = 6x10^{18} cm^{-3}$. Треба да се одреди:

а) слојната отпорност на базниот слој,

б) слојната отпорност на базата под емитерот ако pn-спојот емитер-база се наоѓа на длабочина x = 1 μm.

Решение

а) Од дијаграмот на сликата 3.6-в, кој одговара на дифузија на акцепторски атоми во n-подлога со донорска концентрација $N_{BCD} = 10^{15} cm^{-3}$, произлегува дека за дифузија според Гаусовата функција при $x/x_j = 0$ и површинска концентрација на акцепторите $N_s = 6x10^{18} cm^{-3}$ е:



Сл. 3.8. Зависност на површинската концентрација на дифундирани според Гаусовата функција акцепторски атоми во униформно легиран силициум од n-тип од реципрочната вредност на просечната специфична проводност на добиениот слој

$$R_s(x_j - x) = R_s x_j \doteq 4{,}5\times10^{-2}\ \Omega\text{cm}$$

така што за слојната отпорност на базниот слој се добива:

$$R_s \doteq \frac{4{,}5\times10^{-2}}{x_j} = \frac{4{,}5\times10^{-2}}{2\times10^{-4}} = 225\ \Omega/\square$$

б) Бидејќи е $x = 1\ \mu m$ и $x_j = 2\ \mu m$, не интересира кривата (извлечена со полна линија) што одговара на $x/x_j = 0{,}5$. Од оваа крива за $N_s = 6\times10^{18}\text{cm}^{-3}$ се добива:

$$R_s(x_j - x) = R_s(2-1)\times10^{-4} \doteq 2{,}7\times10^{-1}\ \Omega\text{cm},$$

па слојната отпорност на базата под емитерот изнесува:

$$R_s \doteq 2{,}7\ \text{k}\Omega/\square$$

Пример 3.10.

Со мерење е утврдено дека дебелината и слојната отпорност на дрејнот и сорсот кај некој NMOS-транзистор изнесуваат 3 μm и 20 Ω/□ и дека концентрацијата на акцепторските атоми во подлогата изнесува $N_{BCA} = 10^{16}\text{cm}^{-3}$. Треба да се одреди колку би изнесувала површинската концентрација на дифундираните донорски атоми ако се работи за дифузија според Гаусовата функција, а колку за дифузија според комплементарната функција на грешка.

Решение

а) Од измерените вредности директно следува:

$$\frac{1}{\sigma} = R_s(x_j - x) = R_s x_j = 20\times3\times10^{-4} = 6\times10^{-3}\Omega\text{cm}$$

За одредување на бараните вредности на површинската концентрација, треба да се користи дијаграмот на сликата 3.6-б. Од полната крива за $x/x_j = 0$ произлегува дека во случај на дифузија според Гаусовата функција, површинската густина на дифундираните донорски атоми би изнесувала приближно $4{,}5\times10^{19}\text{cm}^{-3}$. Слично, од испрекинатата крива за $x/x_j = 0$ произлегува дека во случај на дифузија според комплементарната функција на грешка, површинската густина на дифундираните донорски атоми би изнесувала околу $7\times10^{19}\text{cm}^{-3}$.

3.2. Анализа на преодното подрачје на pn-спојот[2-4,6]

3.2.1. Апроксимација на испразнето подрачје

pn-спојот е основна структура во градбата на интегралните кола. Затоа, квалитативното познавање на неговите својства е појдовна претпоставка за разбирање на електричните и технолошките својства на интегралните кола.

Познато е дека p-страната на преодното подрачје на pn-спојот е електрички негативна (поради недоволната компензираност на акцепторските јони со празнини), а n-страната - електрички позитивна (поради недоволната компензираност на донорските јони со слободни електрони). Овие просторни полнежи се меѓусебно еднакви по апсолутната вредност (бидејќи pn-спојот како целина е електрички неутрален), па формираат, заедно, полнежен дипол. Егзактното определување на дистрибуциите на потенцијалот, електричното поле и густината на електричниот полнеж во преодното подрачје, а според тоа и на дебелината, односно специфичната капацитивност на преодното подрачје, претставува доста сложена задача која и во наједноставните случаи не резултира во прегледно аналитичко решение, туку нужно бара нумерички пристап кон проблемот. Затоа,кога не се неопходни наполно точни решенија, се прибегнува кон апроксимацијата позната како апроксимација на испразнето подрачје, која во значителна мерка ја упростува анализата, а истовремено дава резултати кои не се премногу далеку од егзактните.

Во основата на апроксимацијата на испразнето подрачје лежат следниве претпоставки:

- во преодното подрачје не постојат подвижни носители на електрицитет, така што просторниот полнеж во него е резултат само на јонизираните примесни атоми,
- во подрачјата надвор од преодното подрачје постои комплетна компензација на неподвижните носители на електрицитет со подвижни, така што густината на просторниот полнеж и вграденото електрично поле во нив се еднакви на нула,

- проводноста на подрачјата надвор од преодното подрачје е доволно голема за да може во нив да се игнорира електричното поле и во случајот на однадвор приклучен напон.

Примената на апроксимацијата на испразнетото подрачје доведува до резултати според кои интензитетот на полето во преодното подрачје е нешто поголем од стварниот.

3.2.2. pn-спој со произволен pn-премин

На сликата 3.9 и во текстот што следува е прикажана примената на апроксимацијата на испразнето подрачје во одредувањето на густината на просторниот електричен полнеж $\rho(x)$, електричното поле $E(x)$ и потенцијалот $V(x)$ кај pn-спој со произволен профил (разлика на акцепторската и донорската концентрација) $N(x)=N_a-N_d$.

Густината на електричниот полнеж $\rho(x)$ ќе биде дадена со изразот:

$$\rho(x) = \begin{cases} -qN(x), & \text{за } -x_p < x < x_n \\ 0, & \text{за } x < -x_p \text{ и } x > x_n \end{cases} \qquad (3.2.1)$$

каде што $-x_p$ и x_n се границите на преодното подрачје.
Од барањето за неутралност на pn-спојот, како целина, следува:

$$\int_{-x_p}^{o} N(x)\,dx = -\int_{o}^{x_n} N(x)\,dx \qquad (3.2.2)$$

За да се дојде до електричното поле $E(x)$ и потенцијалот $V(x)$, се поаѓа од Пуасоновата релација, т.е. од:

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon_s} \qquad (3.2.3)$$

каде што ρ е даден со (3.2.1) а $\varepsilon_s=\varepsilon_r\varepsilon_o$ е диелектричката константа на полупроводникот (силициумот). Интегрирајќи го (3.2.3) и имајќи предвид дека за $x=-x_p$ треба да е $E(-x_p)=-\left.\frac{dV}{dx}\right|_{x=-x_p}=0$, се добива:

$$E(x) = -\frac{dV}{dx} = \frac{1}{\varepsilon_s}\int_{-x_p}^{x} \rho(y)\,dy = -\frac{q}{\varepsilon_s}\int_{-x_p}^{x} N(y)\,dy \qquad (3.2.4)$$

па зависноста на електричното поле од x ќе изгледа како на сликата 3.9-в. Очигледно е дека полето ќе прими максимална вредност при x=0, бидејќи тогаш ρ(x) го менува знакот, па е:

$$E_{max} = \frac{q}{\varepsilon_s}\int_{-x_p}^{0} N(y)\,dy \qquad (3.2.5)$$

Усвојувајќи ја p-страната како референтна, т.е. претпоставувајќи $V(-x_p)=0$ (сл.3.9-г), согласно со (3.2.4), може да се напише:

$$V(x) = -\int_{-x_p}^{x} E(y)\,dy \qquad (3.2.6)$$

Според тоа, потенцијалната разлика меѓу n-страната и p-страната ќе биде дадена со изразот:

$$V_T = -\int_{-x_p}^{x_n} E(y)\,dy \qquad (3.2.7)$$

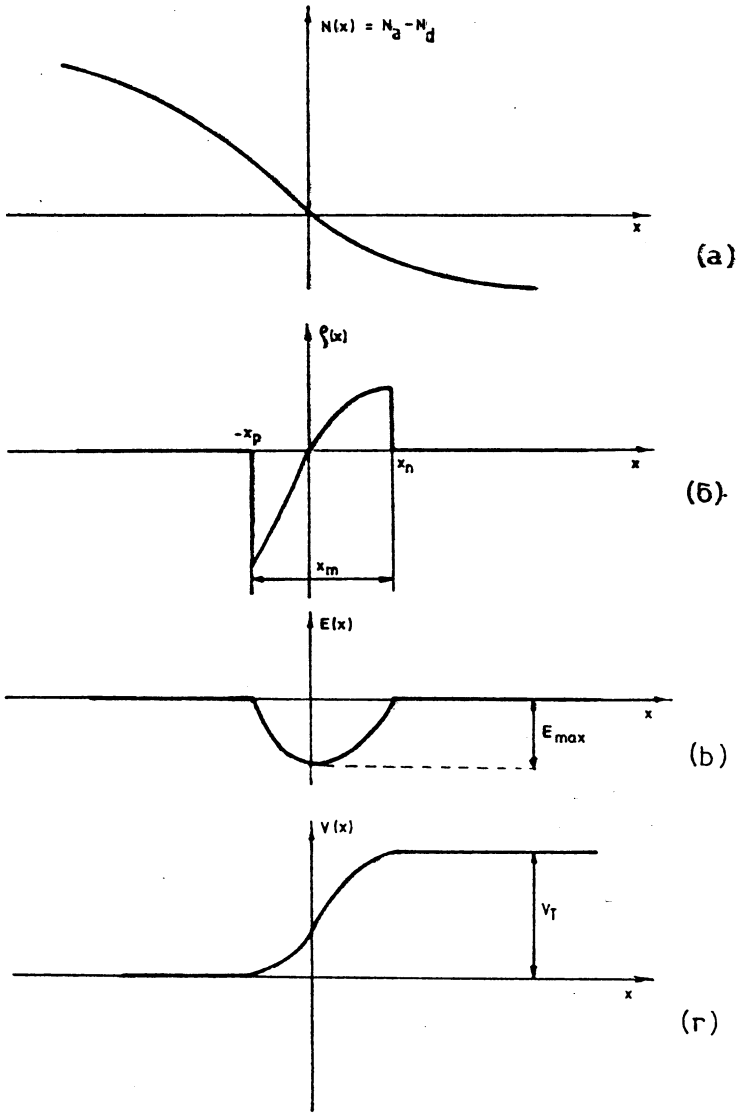
што, со оглед на (3.2.4), е еднакво на:

$$V_T = \frac{q}{\varepsilon_s}\int_{-x_p}^{x_n} dy \int_{-x_p}^{y} N(\alpha)\,d\alpha \qquad (3.2.8)$$

Со примена на теоремата за парцијална интеграција, релацијата (3.2.8) се упростува:

$$V_T = -\frac{q}{\varepsilon_s}\int_{-x_p}^{x_n} yN(y)\,dy \qquad (3.2.9)$$

Врз база на изразите (3.2.2) и (3.2.9), кои ја даваат зависноста на $x_m=x_p+x_n$ од V_T во имплицитен облик, може да се



Сл.3.9. Распределба на густината на електричниот полнеж, полето и потенцијалот кај pn-спој со произволен премин

заклучи дека дебелината на преодното подрачје расте со растењето на тоталната потенцијална разлика меѓу n-страната и p-страната.

Како што е познато, тоталната потенцијална разлика V_T може да се прикаже во обликот:

$$V_T = V + V_c \tag{3.2.10}$$

каде што V е однадвор приклучениот напон (V е позитивен ако се врши инверзна поларизација на pn-спојот), а V_c е т.н. контактна потенцијална разлика. Контактната потенцијална разлика го задоволува познатиот израз [2]:

$$V_c = \frac{kT}{q} \ln \frac{p(-x_{po})n(x_{no})}{n_i^2} = \frac{kT}{q} \ln \frac{|N(-x_{po})N(x_{no})|}{n_i^2} \tag{3.2.11}$$

каде што $-x_{po}$ и x_{no} се границите на преодното подрачје при V=0. Овде $k=1,38\times10^{-23}$ J/K е Болцмановата константа, T е температурата во келвини и n_i е интринсичната концентрација. Според тоа, дебелината на преодното подрачје $x_m=x_p+x_n$ при даден поларизационен напон V е одредена со релациите (3.2.2),(3.2.9), (3.2.10) и (3.2.11). Доколку приклучениот напон V е многу поголем од контактната потенцијална разлика V_c, која обично не е поголема од 0,8 V, согласно со (3.2.10) ќе важи $V_T \pm V$, т.е. при одредување на дебелината на преодното подрачје нема да има потреба да се користи релацијата (3.2.11).

Откако ќе се најдат границите ($-x_p$ и x_n) на преодното подрачје, не претставува никаков проблем да се одреди максималниот интензитет на електричното поле E_{max}. Треба само да се примени релацијата (3.2.5).

Специфичната капацитивност (капацитивноста по единица плоштина) на преодното подрачје на pn-спојот е дефинирана со изразот:

$$C_o = \frac{dQ}{dV_T} \tag{3.2.12}$$

каде што Q е плоштинската густина на полнежот на n-страната на преодното подрачје, т.е.

$$Q = \int_o^{x_n} \rho(x)dx = -q\int_o^{x_n} N(x)dx \tag{3.2.13}$$

Ако горниот израз се диференцира по x_n се добива:

$$dQ = -qN(x_n)\,dx_n \tag{3.2.14}$$

Од друга страна, од (3.2.2) и (3.2.9) произлегува, респективно:

$$N(-x_p)dx_p = -N(x_n)dx_n \tag{3.2.15}$$

$$dV_T = -\frac{q}{\varepsilon_s}[x_n N(x_n)dx_n - x_p N(-x_p)dx_p], \tag{3.2.16}$$

па е

$$dV_T = -\frac{q}{\varepsilon_s} N(x_n)(x_n+n_p)dx_n \tag{3.2.17}$$

Внесувајќи ги (3.2.14) и (3.2.17) во (3.2.12) се добива:

$$C_o = \frac{\varepsilon_s}{x_n+n_p} = \frac{\varepsilon_s}{x_m} \tag{3.2.18}$$

Значи, специфичната капацитивност на преодното подрачје на pn-спојот е дадена со познатиот израз за специфичната капацитивност на планпаралелниот кондензатор.

3.2.3. pn-споеви со скокообразен, односно со линеарен pn-премин

Строго земено, во практиката не постојат pn-споеви со скокообразен односно со линеарен pn-премин, т.е. скокообразни и линеарни pn-споеви. Меѓутоа, проучувањето на овие едноставни pn-споеви е корисно бидејќи обезбедува квалитативен увид во однесувањето на реалните pn-споеви. Освен тоа, понекогаш, кога се сака по кратка постапка да се добијат определени квантитативни показатели за некои реални pn-споеви, како едноставен модел за изведување на пресметките се користи скокообразниот или пак линеарниот pn-спој. Така, на пример, плитките pn-споеви, каков што е емитерскиот, честопати се апроксимираат со едностраниот скокообразен pn-спој (скокообразен pn-спој кај кој

концентрацијата на примеси на едната страна е многу поголема од концентрацијата на примеси на другата страна), а за апроксимација на длабоките pn-споеви, каков што е колекторскиот, се користи линеарниот pn-спој. Меѓутоа, при примената на овие апроксимации е неопходна одредена претпазливост доколку се сака да се избегнат поголеми грешки во процената.

Скокообразен pn-спој На сликата 3.10 се прикажани распределбите на густината на електричниот полнеж, полето и потенцијалот кај скокообразниот pn-спој.

Согласно со релацијата (3.2.2) се добива:

$$N_A x_p = N_D x_n \qquad (3.2.19)$$

каде што N_A е нето-акцепторската концентрација на p-страната, а N_D е нето-донорската концентрација на n-страната. Комбинирајќи го (3.2.19) со $x_m = x_p + x_n$, се добива:

$$x_p = \frac{N_D}{N_A+N_D}\, x_m \qquad (3.2.20)$$

$$x_n = \frac{N_A}{N_A+N_D}\, x_m \qquad (3.2.21)$$

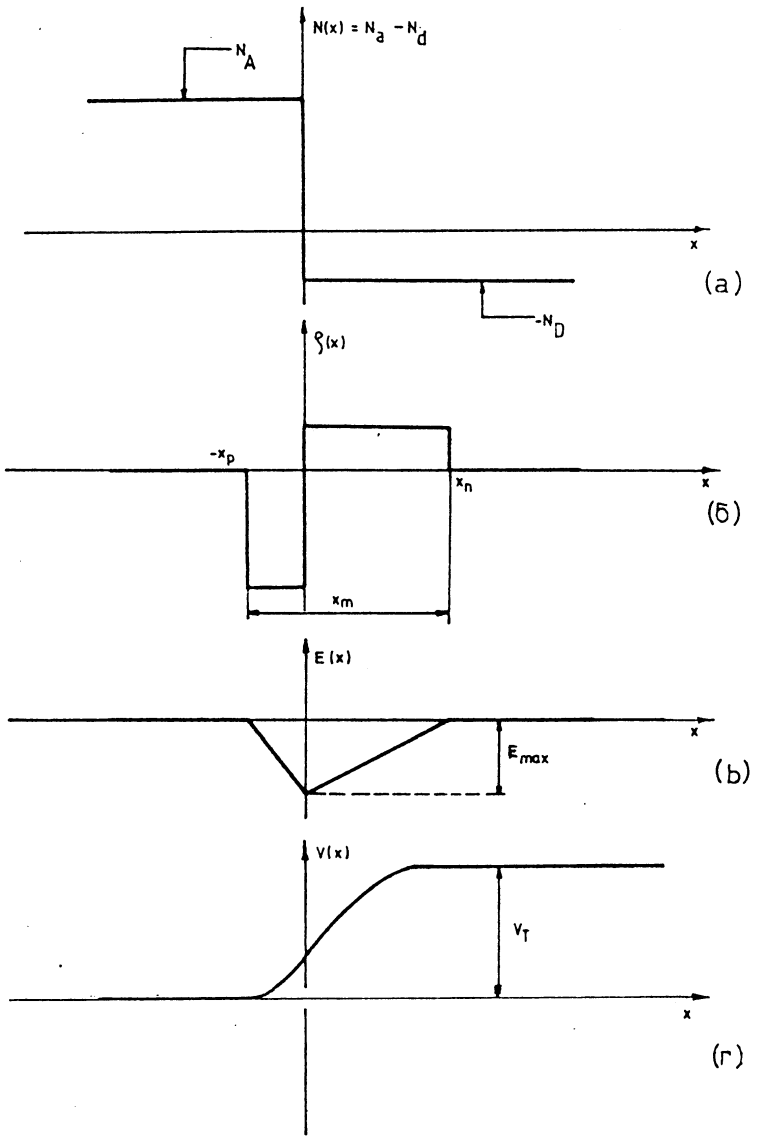
Од (3.2.5) и (3.2.20) произлегува дека максималниот интензитет на електричното поле е даден со:

$$E_{max} = \frac{q}{\varepsilon_s} \frac{N_A N_D}{N_A+N_D}\, x_m, \qquad (3.2.22)$$

а според (3.2.9), (3.2.20) и (3.2.21), дека тоталната потенцијална разлика меѓу n-страната и p-страната ја задоволува следната релација:

$$V_T = \frac{q}{2\varepsilon_s} \frac{N_A N_D}{N_A+N_D}\, x_m^2 \qquad (3.2.23)$$

Тоталната потенцијална разлика при даден приклучен напон V е позната, бидејќи, согласно со (3.2.10) и (3.2.11), е:



Сл.3.10. Распределба на густината на електричниот полнеж, полето и потенцијалот кај скокообразниот pn-спој

$$V_T = V + \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}, \qquad (3.2.24)$$

па дебелината на преодното подрачје x_m може да се најде директно од (3.2.23), т.е.

$$x_m = \left[\frac{2\varepsilon_s (N_A+N_D)}{qN_A N_D}\right]^{1/2} V_T^{1/2} \qquad (3.2.25)$$

Освен изразот (3.2.22), за пресметување на максималното електрично поле може да се користат и изразите:

$$E_{max} = \frac{2V_T}{x_m} \qquad (3.2.26)$$

$$E_{max} = \left[\frac{2qN_A N_D}{\varepsilon_s (N_A+N_D)}\right]^{1/2} V_T^{1/2} \qquad (2.2.27)$$

кои следуваат директно од (3.2.22) и (3.2.23).

Согласно со (3.2.18) и (3.2.25), специфичната капацитивност на преодното подрачје ќе биде дадена со изразот:

$$C_o = \left[\frac{q\varepsilon_s N_A N_D}{2(N_A+N_D)}\right]^{1/2} V_T^{-1/2} \qquad (2.3.28)$$

Во случајот на едностран скокообразен pn-спој, релациите (3.2.25), (3.2.27) и (3.2.28) примаат нешто поедноставен облик. На пример, за $N_D >> N_A$ се довива:

$$x_m = \left(\frac{2\varepsilon_s V_T}{qN_A}\right)^{1/2} \qquad (3.2.29)$$

$$E_{max} = \left(\frac{2qN_A V_T}{\varepsilon_s}\right)^{1/2} \qquad (3.2.30)$$

$$C_o = \left(\frac{q\varepsilon_s N_A}{2V_T}\right)^{1/2} \qquad (3.2.31)$$

Линеарен pn-спој На сликата 3.11 се прикажани распределбите на густината на електричниот полнеж, полето и потенцијалот кај линеарниот pn-спој.

Согласно со релацијата (3.2.2), се добива

$$x_p = x_n = x_m/2 \qquad (3.2.32)$$

Од (3.2.5) и (3.2.32) произлегува дека максималниот интензитет на електричното поле е даден со:

$$E_{max} = \frac{q}{8\varepsilon_s} k_o x_m^2 \qquad (3.2.33)$$

каде што $-k_o$ е наклонот на N(x). Според (3.2.9) и (3.2.32), тоталната потенцијална разлика меѓу n-страната и p-страната ја задоволува релацијата:

$$V_T = \frac{q}{12\varepsilon_s} k_o x_m^3 \qquad (3.2.34)$$

од каде што следува:

$$x_m = \left(\frac{12\varepsilon_s}{qk_o}\right)^{1/3} V_T^{1/3} \qquad (3.2.35)$$

Кај линеарниот pn-спој, контактната потенцијална разлика V_c е решение на системот

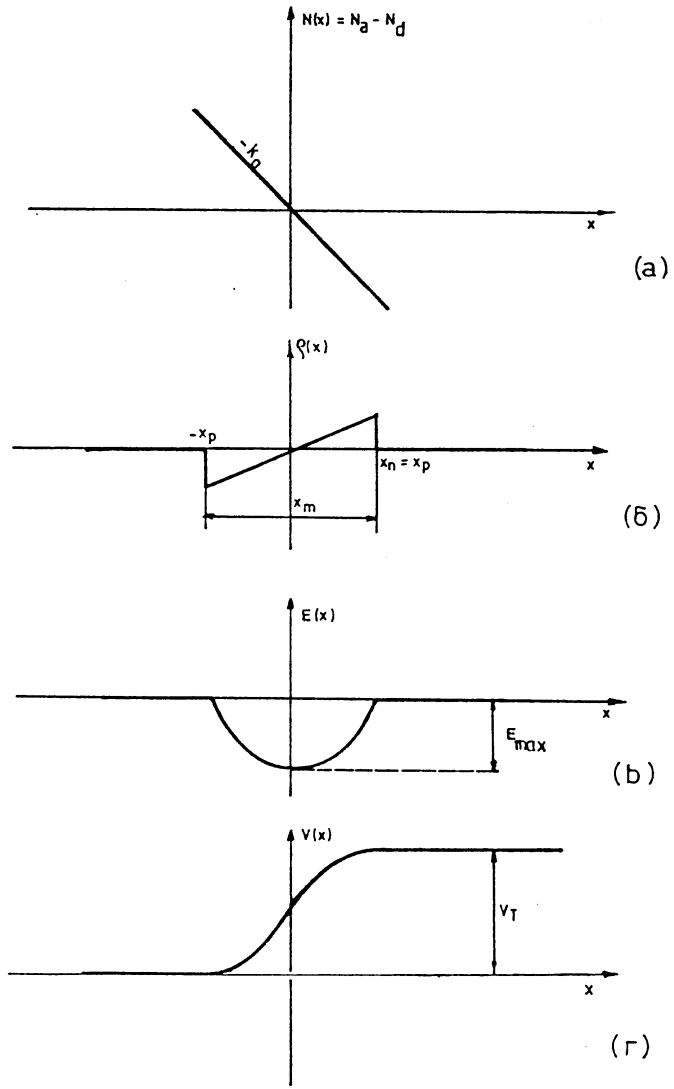
$$V_c = \frac{2kT}{q} \ln \frac{k_o x_{mo}}{2n_i} \qquad (3.2.36)$$

$$V_c = \frac{q}{12\varepsilon_s} k_o x_{mo}^3 \qquad (3.2.37)$$

каде што со x_{mo} е означена дебелината на преодното подрачје при рамнотежна состојба т.е. при V=0. Имено, изразот (3.2.36) произлегува од (3.2.11) и (3.2.32), а изразот (3.2.37) од изразот (3.2.34).

Освен изразот (3.2.33), за одредување на максималното електрично поле можат да се користат и изразите

$$E_{max} = \frac{3V_T}{2x_m} \qquad (3.2.38)$$



Сл.3.11. Распределба на густината на електричниот полнеж, полето и потенцијалот кај линеарниот pn-спој

$$E_{max} = \left(\frac{9}{32}\frac{qk_o}{\varepsilon_s}\right)^{1/3} V_T^{2/3} \qquad (3.2.39)$$

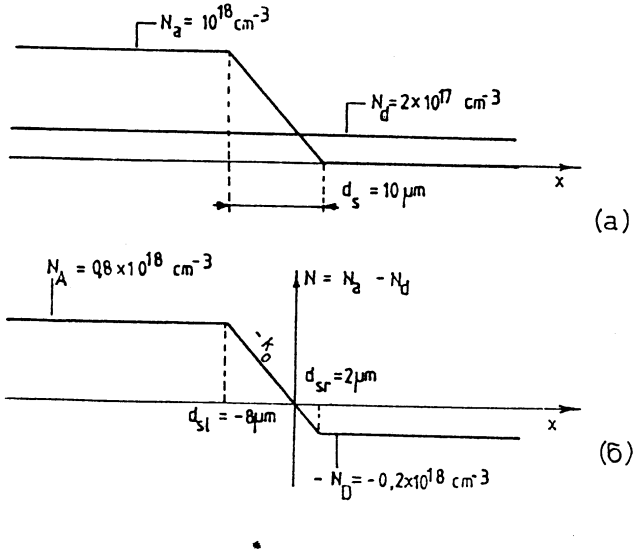
кои следуваат директно од (3.2.33) и (3.2.34).

Специфичната капацитивност на pn-спојот, согласно со (3.2.18) и (3.2.35), ќе биде дадена со изразот:

$$C_o = \left(\frac{k_o q \varepsilon_s^2}{12}\right)^{1/3} V_T^{-1/3} \qquad (3.2.40)$$

Пример 3.11.

На сликата 3.12-а се прикажани акцепторскиот и донорскиот профил на некој pn-спој. Треба да се одреди дебелината на преодното подрачје x_m при инверзен напон од 20 V. Колкави се соодветните вредности на E_{max} и C_o? Релативната диелектричка константа на силициумот е $\varepsilon_r = 11,8$.



Сл.3.12. Илустрација во врска со примерот 3.11.

Решение

Профилот на разликата на акцепторската и донорската концентрација на pn-спојот ќе изгледа како на сликата 3.12-б, при што коефициентот на правецот на стрмниот дел ќе изнесува:

$$k_o = \frac{N_A+N_D}{d_s} = \frac{10^{18}}{10x10^{-4}} = 10^{21}\ cm^{-4}$$

Да претпоставиме дека дебелината на предното подрачје е доволно мала за pn-спојот да може да се третира како линеарен. Во таков случај, согласно со (3.2.35), а со оглед на $V_T=V+V_c=20+V_c\doteq 20\ V$, ќе важи:

$$x_m = \left(\frac{12\varepsilon_s V_T}{qk_o}\right)^{1/3} \doteq \left(\frac{12x11,8x8,85x10^{-14}x20}{1,6x10^{-19}x10^{21}}\right)^{1/3}$$

$$\doteq 1,16x10^{-4}cm = 1,16\ \mu m$$

и според тоа:

$$x_n = -x_p = \frac{x_m}{2} \doteq 0,58\ \mu m$$

Со оглед на тоа што вака пресметаните граници на преодното подрачје се наоѓаат во рамките на стрмниот (линеарниот) дел од примесниот профил, заклучуваме дека направената претпоставка е точна, т.е. дека pn-спојот може да се смета како линеарен. Според тоа, добиената вредност за x_m е истовремено и бараната дебелина на преодното подрачје.

Согласно со (3.2.38), се добива:

$$E_{max} = \frac{3V_T}{2x_m} = \frac{3x20}{2x1,16x10^{-4}} \doteq 2,59x10^5 V/cm$$

Во случајов, за пресметување на специфичната капацитивност е наједноставно да се користи општиот израз

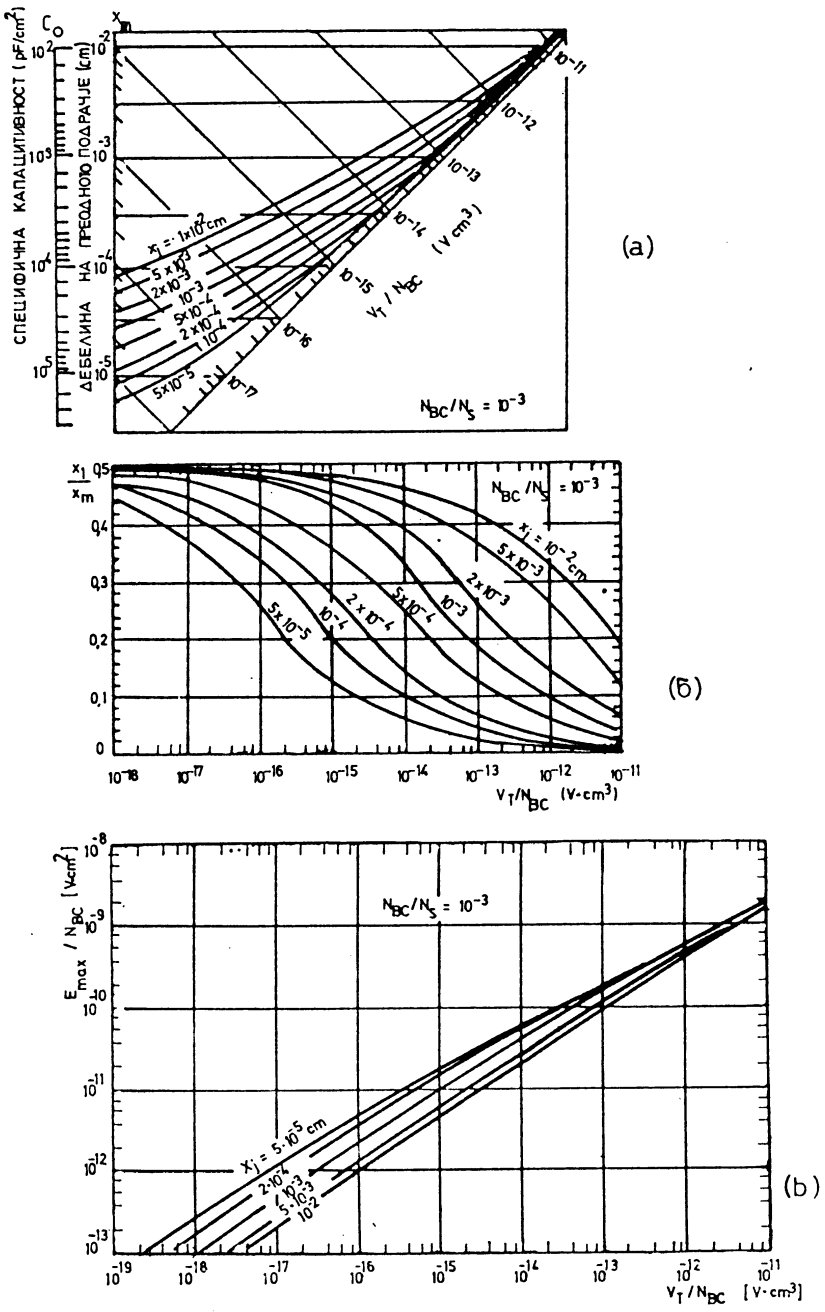
$$C_o = \frac{\varepsilon_s}{x_m} = \frac{\varepsilon_r\varepsilon_o}{x_m} = \frac{11,8x8,85x10^{-14}}{1,16x10^{-4}} \doteq 9,00x10^{-9}F/cm^2$$

3.2.4. Лоренс-Ворнерови криви [3,4,6]

Примесните профили на pn-споевите кај интегралните кола се опишани со Гаусовата функција и/или со комплементарната функција на грешка. Значи, од аналитичка гледна точка, тие не се така едноставни како профилите на скокообразниот односно линеарниот pn-спој. Консеквентно, не постојат практички употребливи аналитички изрази за дебелината, максималниот интензитет на полето и специфичната капацитивност на предното подрачје кај интегралните pn-споеви. Меѓутоа, Лоренс и Ворнер, по нумерички пат, дошле до дијаграми кои овозможуваат да се најдат овие параметри кај оние интегрални pn-споеви што се добиени по пат на дифузија на примеси според Гаусовата функција, односно според комплементарната функција на грешка во подлога со константна концентрација на примеси.

Како илустрација, на сликата 3.13 се дадени Лоренс-Ворнеровите криви за случајот на дифузија според Гаусовата функција при $N_{BC}/N_s=10^{-3}$, каде што N_{BC} е нето-примесната концентрација на подлогата, а N_s е површинската концентрација на дифундираните примеси. Сосема слични по облик се и кривите што одговараат на други вредности на односот N_{BC}/N_s (на пример, на 10^{-2} или 10^{-4}), како и Лоренс-Ворнеровите криви за случајот на дифузија според комплементарната функција на грешка.

Кривите на сликата 3.13-а ја даваат зависноста на дебелината x_m и специфичната капацитивност C_o на преодното подрачје од величината V_T/N_{BC}, каде што напонот V_T е еднаков на тоталната потенцијална разлика кај pn-спојот, т.е. тој ја вклучува во себе контактната потенцијална разлика V_c и однадвор приклучениот напон V. Кај pn-споевите добиени по пат на дифузија, контактната потенцијална разлика изнесува околу 0,7 V и притоа слабо се менува со промената на профилот на pn-спојот. На сликата 3.13-б е прикажана зависноста на односот x_1/x_m од величината V_T/N_{BC}, каде што x_1 е дебелината на преодното подрачје на онаа страна од pn-спојот од која се врши дифузијата. Конечно, на сликата 3.13-в е прикажана зависноста на максималниот интензитет на електричното поле во преодното подрачје од величината V_T/N_{BC}. Во сите случаи како параметар се јавува длабочината на pn-спојот x_j.



Сл.3.13. Лоренс-Ворнерови криви за дифузија според Гаусовата функција во подлога со константна концентрација на примеси

Со оглед на тоа што Лоренс-Ворнеровите криви се однесуваат на дифузија во подлога со константна концентрација на примеси, тие се применливи на pn-споевите добиени со базната, односно со изолационата дифузија, но не и на емитерските pn-споеви. Имено, во последниот случај се работи за дифузија во подрачја во кои претходно е извршена базната дифузија,т.е. кои не се хомогени во поглед на концентрацијата на примеси.

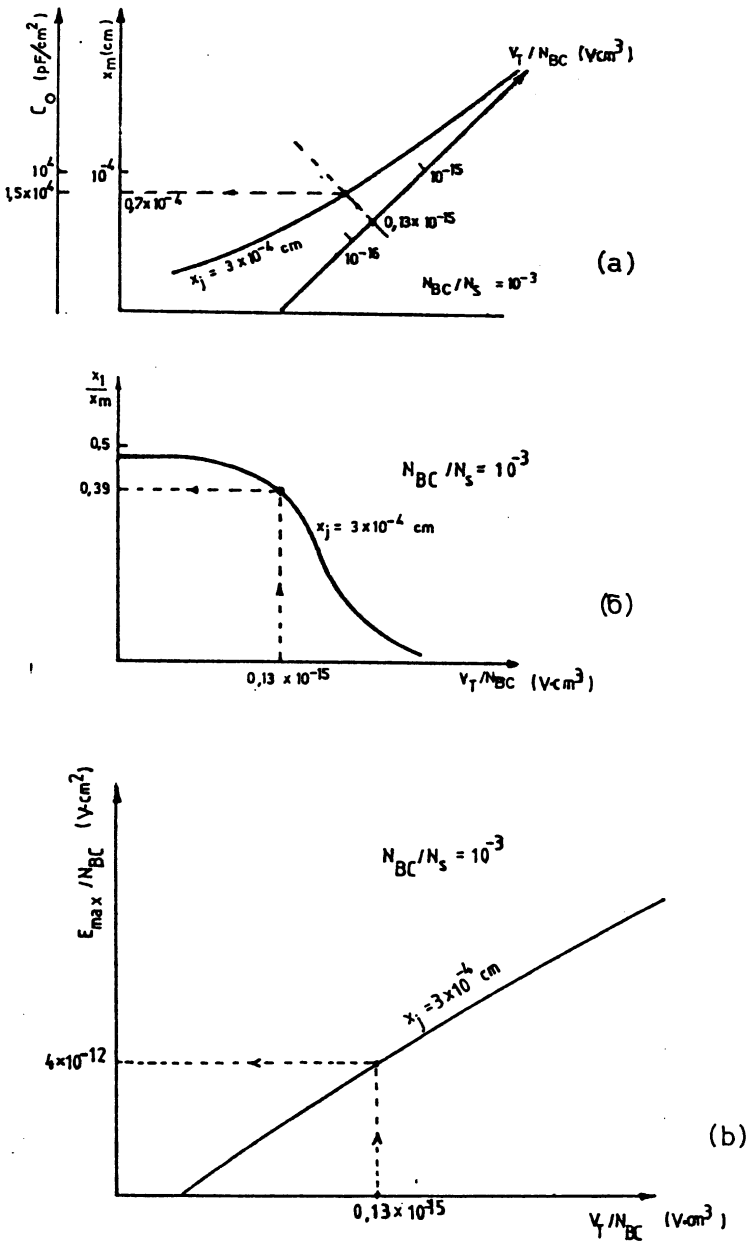
Пример 3.12.

Базниот слој на даден npn-транзистор е дифундиран според Гаусовата функција во епитаксијален слој со рамномерна концентрација на донорски атоми $N_{BC}=5,4x10^{15}cm^{-3}$. Дебелината на базниот слој е $x_j=3x10^{-4}cm$, а површинската густина на дифундираните акцепторски атоми изнесува $N_s=5,4x10^{18}cm^{-3}$. Треба да се одреди дебелината x_m, специфичната капацитивност C_o и максималното електрично поле E_{max} на преодното подрачје ако однадвор приклучениот напон е еднаков на нула. Колку во тој случај изнесуваат дебелината на преодното подрачје на страната на базата x_{pc} и дебелината на преодното подрачје на страната на колекторот x_{nc}?

Решение

Од условите на задачата следува дека односот N_{BC}/N_s изнесува 10^{-3} и дека се работи за Гаусова функција, па бараните величини можат да се одредат со помош на Лоренс-Ворнеровите криви на сликата 3.13.

При надворешен напон еднаков на нула е $V_T=V+V_c=V_c\doteq 0,7$ V и, според тоа, $V_T/N_{BC}\doteq 0,13x10^{-15}V\,cm^3$. Од дијаграмот на сликата 3.13-а, нанесувајќи го износот $0,13x10^{-15}V\,cm^3$ на правецот V_T/N_{BC} и движејќи се дијагонално до пресекот со кривата $x_j=3x10^{-4}cm$ (потребна е интерполација меѓу $2x10^{-4}$ и $5x10^{-4}$, може да се отчита дебелината $x_m\doteq 0,7x10^{-4}cm$ и специфичната капацитивност $C_o\doteq 1,5 x10^4 pF/cm^2$ на преодното подрачје. Од дијаграмот на сликата 3.13-б за истиот x_j се добива односот $x_1/x_m\doteq 0,39$, па може да се заклучи дека дебелината на преодното подрачје на страната на базата изнесува $x_{pc}=x_1\doteq 0,39x_m\doteq 0,39x0,70x10^{-4}=0,273x10^{-4}cm$. Консеквентно, за дебелината на преодното подрачје на страната на колекторот се до-



Сл.3.14. Резиме за начинот на примена на Лоренс-Ворнеровите криви во случајот на примерот 3.12.

бива $x_{nc}=x_m-x_{pc}\doteq 0,427\times10^{-4}$cm. Слично, од дијаграмот на сликата 3.13-в за $V_T/N_{BC}=0,13\times10^{-15}$ Vcm^3 и $x_j=3\times10^{-4}$cm се добива $E_{max}/N_{BC}\doteq 4\times10^{12}$Vcm^2, па е $E_{max}\doteq 21,6$ kV/cm.

На сликата 3.14 е резимиран начинот на користењето на Лоренс-Ворнеровите криви за наоѓање на величините x_m, C_o, x_1/x_m и E_{max} во дадениот пример.

Треба да се забележи дека добиените вредности за x_{pc} и x_{nc} значително се разликуваат меѓусебно. Тоа укажува на фактот дека евентуалната апроксимација на овој pn-спој со линеарен pn-спој (кај линеарниот pn-спој е $x_p=x_n$) би била доста лоша.

3.2.5. Нумеричко одредување на дебелината, специфичната капацитивност и максималното електрично поле на преодното подрачје кај pn-спој со произволен примесен профил [4]

Во случајот на интегрален pn-спој со примесен профил за кој Лоренс-Ворнеровите криви се неприменливи, дебелината, специфичната капацитивност и максималното електрично поле на преодното подрачје, се одредуваат по нумерички пат - со помош на компјутер. За таа цел, откако врз база на дадените податоци се одреди примесниот профил N(x), може да се примени долу наведениот алгоритам.

1. Избираме точка $-x_L$ на левата страна од спојот и пресметуваме

$$Q_L = -\int_{-x_L}^{0} qN(y)\,dy$$

2. Избираме точка x_R на десната страна од спојот и пресметуваме

$$Q_R = -\int_{0}^{x_R} qN(y)\,dy$$

3. Ако е $-Q_R\neq Q_L$ го менуваме x_R и го повторуваме чекорот (2) додека не добиеме $-Q_R=Q_L$

4. Пресметуваме

$$V_T = -\frac{q}{\varepsilon_s}\int_{-x_L}^{x_R} yN(y)\,dy$$

5. Пресметуваме

$$V_c' = \frac{kT}{q} \ln \frac{N(-x_L)N(x_R)}{n_i^2}$$

6. Ако е $V_c' \neq V_T$, избираме нов x_L и ја повторуваме целата постапка додека не добиеме $V_c'=V_T$. Така добиената вредност V_c' ќе биде еднаква на контактната потенцијална разлика V_c, а $-x_L$ и x_R ќе одговараат на границите на преодното подрачје $-x_{po}$ и x_{no} при нулев надворешен напон.

7. Пресметуваме

$$V_{T1} = V + V_c$$

каде што V е приклучениот инверзен напон.

8. Избираме точка $-x_L$ лево од $-x_{po}$ и ги повторуваме чекорите од (1) до (4).

9. Ако е $V_T \neq V_{T1}$, избираме нов x_L и го повторуваме (8) додека не добиеме $V_T=V_{T1}$. Соодветните вредности за $-x_L$ и x_R ќе одговараат на границите на преодното подрачје $-x_p$ и x_n за приклучен инверзен напон V. Пресметаното Q_R ќе одговара на полнежот на n-страната, т.е. на Q.

10. Пресметуваме

$$x_m = x_p + x_n, \quad C_o = \varepsilon_s/(x_p+x_n), \quad E_{max} = Q/\varepsilon_s.$$

3.2.6. Пробивен напон кај pn-спојот[3,4]

Доминантен механизам кој доведува до пробив кај интегралните pn-споеви е лавинската мултипликација. До пробив доаѓа кога максималното електрично поле во преодното подрачје ќе стане поголемо од некое критично поле E_c. Мерењата покажуваат дека критичното поле E_c слабо зависи од примесниот профил на pn-спојот и дека неговата типична вредност за силициумот е $E_c=4\times10^5$ V/cm.

Обично, контактната потенцијална разлика е занемарливо мала во однос на пробивниот напон, па може да се смета дека во близината на пробивот приклученият напон V е приближно еднаков на тоталната потенцијална разлика V_T. Според тоа, согласно со (3.2.27), пробивниот напон кај скокообразниот pn-спој ќе биде даден со релацијата:

$$V_{(BR)} = \frac{E_c^2 \varepsilon_s (N_A+N_D)}{2qN_AN_D} \qquad (3.2.41)$$

а,согласно со (3.2.39), за линеарниот pn-спој се добива:

$$V_{(BR)} = \frac{4E_c^{3/2}}{3}\left(\frac{2\varepsilon_s}{qk_o}\right)^{1/2}. \qquad (3.2.42)$$

Пример 3.13.

Кај некој едностран pn-спој е $N_{BC}=10^{16}cm^{-3}$. Одреди го пробивниот напон.

Решение

Согласно со релацијата (3.2.41):

$$V_{(BR)} = \frac{E_c^2\varepsilon_s}{2qN_{BC}} = \frac{16\times10^{10}\times11,8\times8,85\times10^{-14}}{2\times1,6\times10^{-19}\times10^{16}} = 52,2 \text{ V}$$

Пример 3.14.

Треба да се одреди пробивниот напон на pn-спој добиен со Гаусова дифузија во подлога со константна концентрација на примеси, ако е $N_s=5\times10^{18}cm^{-3}$, $N_{BC}=10^{16}cm^{-3}$ и ако далбочината на pn-спојот изнесува $x_j=2$ μm..

Решение

Во даденият случај е $N_{BC}/N_s=2\times10^{-3}$. Меѓутоа, максималниот интензитет на полето е само слаба функција од N_{BC}/N_s, па може да се користат кривите на сликата 3.13-в. Проблемот ќе се реши ако се одреди при која тотална потенцијална разлика V_T се

продуцира поле $E_{max}=E_c$. За таа цел се влегува во дијаграмот при ординатата $E_c/N_{BC}=4x10^5/10^{16}=4x10^{-11}$ V cm^2 и се оди хоризонтално, кон десно, до пресекот со кривата што одговара на $x_j=2x10^{-4}$ cm. Потоа, вертикално надолу се отчитува:

$$\frac{V_T}{N_{BC}} \doteq 5{,}5x10^{-15}\ Vcm^3$$

Оттука следува:

$$V_T = V + V_c \doteq 55\ V$$

Во случајов, контактната потенцијална разлика V_c е занемарливо мала во однос на тоталната потенцијална разлика V_T, па може да се заклучи дека приклучениот напон при кој доаѓа до пробив изнесува околу 55 V.

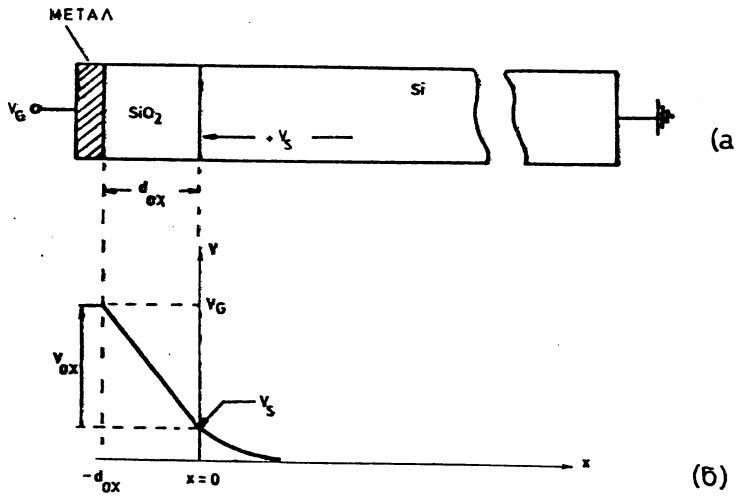
3.3. MOS-структури [1-4,24]

3.3.1. Основни релации кај MOS-структурите

На сликата 3.15-а е даден приказ на една MOS-структура. Со d_{ox} е означена дебелината на оксидниот слој, а со V_G - приклучениот напон на металната електрода. Полупроводникот е хомоген и од произволен тип на проводност.

Се поставува прашањето колкав полнеж и во каква форма и распределба ќе биде индуциран во полупроводникот, под оскидниот слој. Исто така, од интерес е и вредноста на потенцијалот V_s што ќе се појави на површината на полупроводникот (сл.3.15-б).

Во оксидниот слој полето ќе биде хомогено (независно од положбата). Тоа е затоа што во соодветниот простор не постои електричен полнеж. Што се однесува до полето во полупроводникот, може да се очекува дека неговиот интензитет ќе се намалува кога ќе се оди од површината кон внатрешноста и дека ќе стане занемарливо мал на одредена длабочина - која ќе зависи, меѓу другото, од концентрацијата и типот на примесите, како и од големината и знакот на приклучениот напон V_G.



Сл.3.15. MOS-структура (а) и распределба на потенцијалот (б)

Ако со $V_{ox}=V_G-V_s$ се означи падот на напонот на оксидниот слој, со E_{ox} - електричното поле во оксидниот слој, со Q_s - плоштинската густина на индуцираниот полнеж во полупроводникот под оксидниот слој, со ε_{ox} - диелектричката константа на оксидниот слој и со C_{ox} - специфичната капацитивност на оксидниот слој, може, согласно со Гаусовиот закон, да се напише:

$$V_{ox} = E_{ox}d_{ox} = \frac{-Q_s}{\varepsilon_{ox}} d_{ox} = -\frac{Q_s}{C_{ox}} \qquad (3.3.1)$$

односно:

$$V_G = -\frac{Q_s}{C_{ox}} + V_s \qquad (3.3.2)$$

Јасно, за дадена MOS-структура полнежот Q_s е строго определена монотона функција од површинскиот потенцијал V_s. Според тоа, доколку е позната зависноста $Q_s=Q_s(V_s)$, релацијата (3.3.2) овозможува одредување на потенцијалот V_s за произволен напон V_G.

Зависноста $Q_s(V_s)$ може да се одреди преку примена на Пуасоновата равенка, т.е.

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon_s} \qquad (3.3.3)$$

Овде, со V и со ρ се означени потенцијалот и густината на електричниот полнеж во полупроводникот. ε_s е диелектричката константа на полупроводникот. Густината на електричниот полнеж ρ може да се претстави како што следува:

$$\rho = q(p-n+N_d-N_a) \qquad (3.3.4)$$

каде што p и n се концентрациите на празнините, односно електроните, а N_d и N_a - концентрациите на донорските, односно акцепторските атоми. Се разбира, се претпоставува дека сите примесни атоми се јонизирани.

Нека со p_o и n_o бидат означени концентрациите на празнините и електроните во длабочината на полупроводникот - каде што густината на полнежот, интензитетот на полето и потенцијалот се еднакви на нула. Тогаш, со оглед на тоа што во просторот на полупроводникот владее всушност состојба на Болцманова рамнотежа (дрифтната и дифузната компонента на празнинската, односно електронската струја, меѓусебно се поништуваат), може да се напише:

$$p = p_o \exp \frac{-V}{U_T} \qquad (3.3.5)$$

$$n = n_o \exp \frac{V}{U_T} \qquad (3.3.6)$$

каде што $U_T = \frac{kT}{q}$ е напонскиот еквивалент на температурата. Од друга страна, од условот за електрична неутралност на подлабоките подрачја во полупроводникот, согласно со (3.3.4), следува:

$$N_a - N_d = p_o - n_o \qquad (3.3.7)$$

Врз основа на (3.3.3) до (3.3.7) се добива следнава диференцијална равенка за потенцијалот во полупроводникот:

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{q}{\varepsilon_s}\left[p_o\left(\exp\frac{-V}{U_T}-1\right)-n_o\left(\exp\frac{V}{U_T}-1\right)\right] \qquad (3.3.8)$$

Очигледно, со првиот член во средната заграда е дадена ексцесната концентрација на празнините, а со вториот член - ексцесната концентрација на слободните електрони во точка со потенцијал V.

Ако релацијата (3.3.8) се помножи со dV и се интегрира, ќе се добие:

$$\left(\frac{dV}{dx}\right)^2 = \frac{2qU_T}{\varepsilon_s}\left[p_o\left(\exp\frac{-V}{U_T}+\frac{V}{U_T}\right)+n_o\left(\exp\frac{V}{U_T}-\frac{V}{U_T}\right)\right]+C \qquad (3.3.9)$$

каде што C е интеграционата константа. Но при V=0 треба да биде dV/dx=0, па следува дека врската меѓу полето $\left(E=-\frac{dV}{dx}\right)$ и потенцијалот ќе биде дадена со релацијата:

$$E^2 = \frac{2qU_T}{\varepsilon_s}\left[p_o\left(\exp\frac{-V}{U_T}-1+\frac{V}{U_T}\right)+n_o\left(\exp\frac{V}{U_T}-1-\frac{V}{U_T}\right)\right] \qquad (3.3.10)$$

Со воведување на кратенките

$$L_{DE} = \left[\frac{\varepsilon_s U_T}{q(p_o+n_o)}\right]^{1/2} \qquad (3.3.11)$$

$$F(V) = \sqrt{2}\left[\frac{p_o}{p_o+n_o}\left(\exp\frac{-V}{U_T}-1+\frac{V}{U_T}\right)+\frac{n_o}{p_o+n_o}\left(\exp\frac{V}{U_T}-1-\frac{V}{U_T}\right)\right]^{1/2} \qquad (3.3.12)$$

релацијата (3.3.10) може да се напише во обликот:

$$E = -\frac{dV}{dx} = \mathrm{sgn}(V)\,\frac{U_T}{L_{DE}}\,F(V) \qquad (3.3.13)$$

каде што sgn(V)=1 за V>0 и sgn(V)=-1 за V<0. Величината L_{DE} има димензии на должина и е позната како Дебиева должина. При $|V|<<U_T$ е $F(V)=|V/U_T|$, па изразот (3.3.13), се сведува на $-dV/dx = V/L_{DE}$. Значи, величината L_{DE} одговара на онаа длабочина во полупроводникот при која потенцијалот V е за e-пати помал од површинскиот потенцијал V_s, под претпоставка дека површинскиот потенцијал V_s е доволно мал.

За да се одреди електричното поле E_s при површината на полупроводникот, во изразот (3.3.13) треба само да се стави $V=V_s$, т.е.

$$E_s = \mathrm{sgn}(V_s)\,\frac{U_T}{L_{DE}}\,F(V_s) \qquad (3.3.14)$$

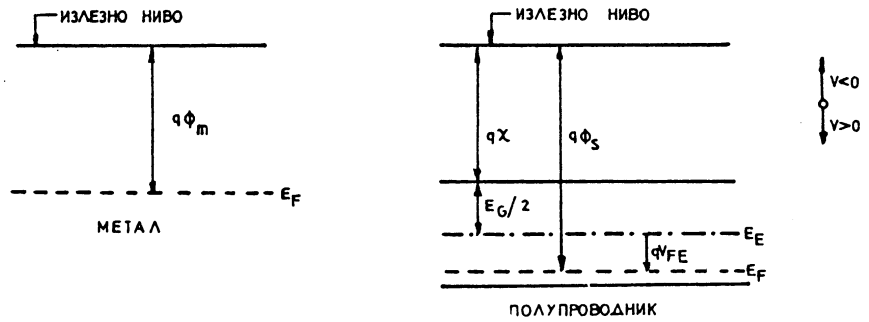
Но, од (3.3.14) директно следува бараниот израз за врската меѓу плоштинската густина на индуцираниот полнеж Q_s и површинскиот потенцијал V_s. Имено, согласно со Гаусовиот закон, важи:

$$Q_s = -\varepsilon_s E_s = -\mathrm{sgn}(V_s)\,\frac{\varepsilon_s U_T}{L_{DE}}\,F(V_s) \qquad (3.3.15)$$

Релациите (3.3.2) и (3.3.15), вклучувајќи ги и изразите (3.3.11) и (3.3.12), се основни релации на MOS-структурата. Тие овозможуваат одредување на површинскиот потенцијал V_s, односно индуцираниот полнеж Q_s при даден, однадвор приклучен, напон V_G. Меѓутоа, треба да се води сметка дека применливоста на релацијата (3.3.2) е ограничена само на т.н. идеална MOS-структура која ги задоволува следниве услови:

а) работните функции на металот и полупроводникот, ϕ_m и ϕ_s, дефинирани како на сликата 3.16 (со E_F се означени Фермиевите нивоа), се меѓусебно еднакви;

б) не постојат други електрични полнежи освен полнежот индуциран во полупроводникот и соодветниот полнеж во металната електрода (овие полнежи се меѓусебно еднакви, но различни по знакот).



Сл.3.16. Дефиниција на работната функција ϕ кај метал (а) и кај полупроводник (б).

За да се добие соодветна релација која ќе важи за која и да било MOS-структура, потребно е релацијата (3.3.2) да се обопшти, т.е. во неа да се земат предвид ефектот на разликата во работните функции на металот и полупроводникот и ефектот на постоењето на површински полнеж на границата меѓу оксидниот слој и полупроводникот.

3.3.2. Ефект на разликата на работните функции на металот и полупроводникот

Согласно со сликата 3.16, работната функција на полупроводникот може да се прикаже како што следува:

$$\phi_s = \chi + \frac{E_G}{2q} + V_{FE} \qquad (3.3.16)$$

Во релацијата (3.3.16), величината χ претставува потенцијална разлика меѓу излезното ниво и дното на проводната зона и е позната како константа на афинитетот на полупроводникот. Таа е независна од типот и концентрацијата на примесите. E_G претставува ширина на забранетата енергетска зона. Величината V_{FE} претставува потенцијална разлика меѓу Фермиевото ниво и средината на забранетата енергетска зона и, според тоа, директно зависи од типот и концентрацијата на примесите. Имено, важи:

$$V_{FE} = U_T \ln \frac{p_o}{n_i} = -U_T \ln \frac{n_o}{n_i} \qquad (3.3.17)$$

каде што со p_o и n_o се означени рамнотежните концентрации на празнините, односно слободните електрони, а n_i е интринсичната концентрација. Според тоа, разликата меѓу работните функции на металот и полупроводникот ќе биде дадена со изразот:

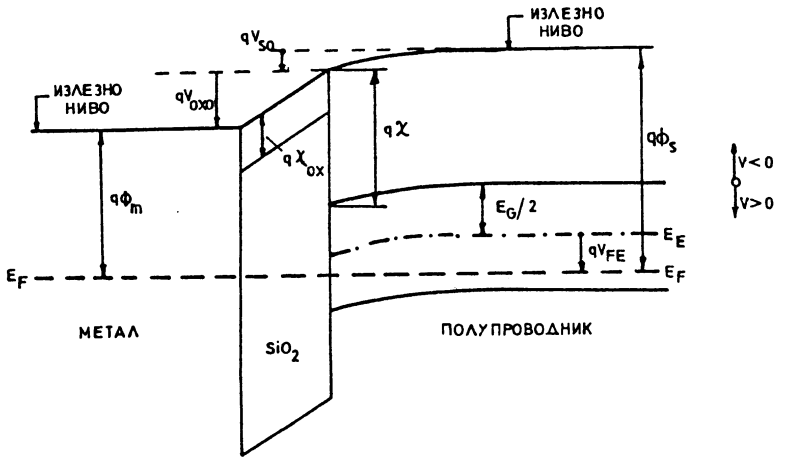
$$\phi_{ms} = \phi_m - (\chi + \frac{E_G}{2q} + V_{FE}) \qquad (3.3.18)$$

Ако се состави MOS-структура од метал и полупроводник што се карактеризираат со различни работни функции, т.е. со различна висина на Фермиевите нивоа, нужно ќе дојде до израмнување на Фермиевите нивоа, т.е. до воспоставување заедничко Фермиево ниво за целата структура. Ова ќе резултира во искривување на енергетските зони на оксидниот слој и полупроводникот, како што е покажано на сликата 3.17, т.е. ќе се појави некој пад на напон V_{oxo} на оксидниот слој и некој пад на напон V_{so} на полупроводникот. Според тоа, иако не е приклучен надворешен напонски извор, на MOS-структурата ќе постои пад на напон даден со:

$$V_{ms} = V_{oxo} + V_{so} = \phi_s - \phi_m = -\phi_{ms} \qquad (3.3.19)$$

кој е познат како контактна потенцијална разлика на MOS-структурата. Треба да се забележи дека контактната потенцијална разлика V_{ms} ќе биде позитивна (т.е. металот ќе биде на повисок потенцијал од полупроводникот) ако работната функција на металот е помала од работната функција на полупроводникот. Во обратниот случај, контактната потенцијална разлика V_{ms} ќе биде негативна.

Појавата на контактна потенцијална разлика кај MOS-структурата се објаснува со минување на електрони - преку оксидниот слој - од средината со повисоко Фермиево ниво (помала работна функција) во средината со пониско Фермиево ниво (поголема работна функција). Ваквата тенденција се јавува затоа што енергетските нивоа на страната со пониско Фермиево ниво се попразни отколку соодветните нивоа на страната со повисоко Фермиево ниво.

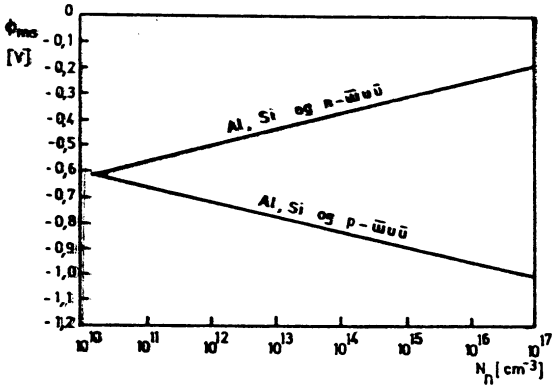


Сл.3.17. Дијаграм на енергетските зони кај MOS-структура без приклучен напон

Согласно со изнесеното, ако на дадена MOS-структура со контактна потенцијална разлика $V_{ms}=-\phi_{ms}$ приклучиме напон V_G, на неа ќе се појави пад на напон $V_G+V_{ms}=V_G-\phi_{ms}$. Според тоа, постоењето контактна потенцијална разлика бара напонот V_G во релацијата (3.3.2) да се замени со $V_G-\phi_{ms}$, т.е. наместо релацијата (3.3.2) да се употребува релацијата:

$$V_G = \frac{-Q_s}{C_{ox}} + V_s + \phi_{ms} \qquad (3.3.20)$$

На сликата 3.18 е прикажана зависноста на разликата $\phi_{ms}=\phi_m-\phi_s$ од нето-примесната концентрација во полупроводникот за комбинацијата алуминиум и силициум. Како што се гледа, ϕ_{ms} е негативен и во случајот на силициум од n-тип и во случајот на силициум од p-тип, но има поголеми вредности за силициум од p-тип ($0{,}6V < |\phi_{ms}| < 1{,}1V$). Дадениот дијаграм е добиен со помош на релацијата (3.3.18) и изразите за потенцијалната разлика V_{FE} кај полупроводник од p-тип и полупроводник од n-тип, т.е.



Сл.3.18. Разлика меѓу работните функции на алуминиумот и силициумот

$$V_{FE} \doteq U_T \ln \frac{N_A}{n_i} \qquad (3.3.21)$$

$$V_{FE} \doteq U_T \ln \frac{n_i}{N_D} \quad , \qquad (3.3.22)$$

кои следуваат директно од (3.3.17), ако кај полупроводник од p-тип концентрацијата p_o се апроксимира со нето-акцепторската концентрација N_A, односно кај полупроводник од n-тип концентрацијата n_o се апроксимира со нето-донорската концентрација N_D. Кај силициумот, при собна температура, е $\chi=4{,}35\ V$, $E_G/q=1{,}12\ V$ и $n_i=1{,}5\times10^{10}cm^{-3}$. Работните функции на алуминиумот и на некои други метали, важни во микроелектрониката, се дадени во табелата 3.1.

Табела 3.1. Работни функции на некои поважни метали

Метал	ϕ_m(V)
Mg	3,70
Al	4,30
Ni	4,50
Cu	4,40
Ag	4,30
Pt	5,30
Au	4,80

3.3.3. Ефект на површинскиот полнеж

Во практиката, кај MOS-структурите е присутен одреден фиксен позитивен површински полнеж Q_{ss}, кој е лоциран во силициумдиоксидот, но многу блиску до спојната површина SiO_2-Si. Количеството на полнежот Q_{ss} зависи од условите при кои се врши оксидацијата и од кристалната ориентација на силицуумот (најголемо е при ориентацијата (111), а најмало при ориентацијата(100)). Типичната вредност на Q_{ss} се движи од 10^{-9} до 10^{-7} C cm^{-2}.

Полнежот Q_{ss} бара, согласно со Гаусовиот закон, падот на напонот на оксидниот слој, т.е. првиот член во изразот(3.3.2), односно (3.3.20), да се модифицира како што следува:

$$V_{ox} = E_{ox}d_{ox} = -\frac{Q_s+Q_{ss}}{\varepsilon_{ox}}d_{ox} = -\frac{Q_s+Q_{ss}}{C_{ox}} \qquad (3.3.23)$$

Според тоа, најопштиот облик на изразот за врската меѓу приклучениот напон V_G и површинскиот потенцијал V_s, односно индуцираниот полнеж Q_s, гласи:

$$V_G = -\frac{Q_s+Q_{ss}}{C_{ox}} + V_s + \phi_{ms} \qquad (3.3.24)$$

3.3.4. Подрачја на работа на MOS-структурата

Заради конкретизација на изложувањето, во натамошната дискусија ќе се претпостави дека употребениот полупроводник е од p-тип. Слична дискусија важи и за полупроводник од n-тип.

За полупроводник од p-тип, со нето-акцепторска концентрација $N_A=N_a-N_d>>n_i$, е $p_o \doteq N_A$, $n_o \doteq n_i^2/N_A << p_o$ и, согласно(3.3.21), $n_i/N_A \doteq \exp\frac{-V_{FE}}{U_T}$. Според тоа, релациите (3.3.11) и (3.3.12) можат да се напишат во следниов облик:

$$L_{DE} \doteq \left(\frac{\varepsilon_s U_T}{qN_A}\right)^{1/2} \qquad (3.3.25)$$

$$F(V) \doteq \sqrt{2}\left[\left(\exp\frac{-V}{U_T} - 1 + \frac{V}{U_T}\right) + \exp\frac{-2V_{FE}}{U_T}\left(\exp\frac{V}{U_T} - 1 - \frac{V}{U_T}\right)\right]^{1/2} \qquad (3.3.26)$$

а индуцираниот полнеж Q_s за даден површински потенцијал V_s, согласно (3.3.15), ќе биде даден со изразот:

$$Q_s \doteq -\mathrm{sgn}(V_s)\sqrt{2q\varepsilon_s U_T N_A}\,\chi\left[\left(\exp\frac{-V_s}{U_T} - 1 + \frac{V_s}{U_T}\right) + \exp\frac{-2V_{FE}}{U_T}\left(\exp\frac{V_s}{U_T} - 1 - \frac{V_s}{U_T}\right)\right]^{1/2} \qquad (3.3.27)$$

Пример 3.15.

Пресметај ја Дебиевата должина на:

а) интринсичен силициум,

б) силициум со нето-акцепторска концентрација $N_A=3\times10^{15}cm^{-3}$.

Решение

(а) Согласно со (3.3.11), се добива:

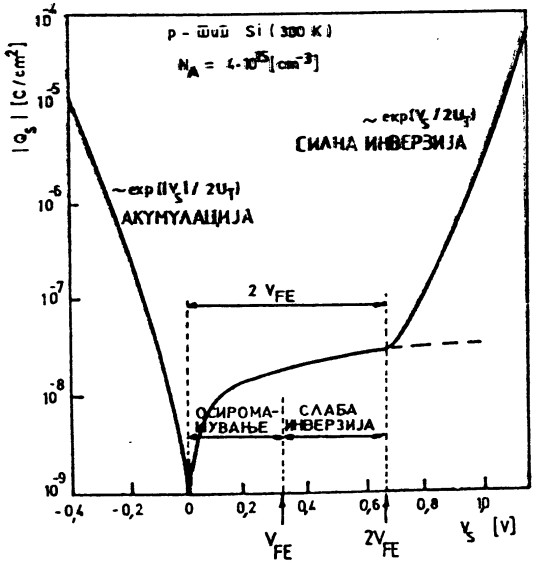
$$L_{DEi} = \left(\frac{\varepsilon_s U_T}{2qn_i}\right)^{1/2} \doteq \left(\frac{11,8\times8,85\times10^{-14}\times26\times10^{-3}}{2\times1,6\times10^{-19}\times1,5\times10^{10}}\right)^{1/2} \doteq 23,78\times10^{-4}cm$$

(б) Согласно со (3.3.25), се добива:

$$L_{DE} \doteq \left(\frac{11,8\times8,85\times10^{-14}\times26\times10^{-3}}{1,6\times10^{-19}\times3\times10^{15}}\right)^{1/2} \doteq 0,075\times10^{-4}cm$$

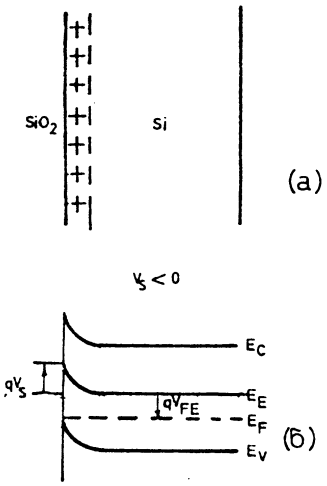
На сликата 3.19 е прикажана зависноста на Q_s од V_s за еден конкретен полупроводник од p-тип. Како што е назначено, на

кривата можат да се разликуваат три различни подрачја - кои наедно претставуваат и подрачја на работа на MOS-структурата - т.е.: (1) подрачје на акумулација, (2) подрачје на осиромашување и слаба инверзија и (3) подрачје на силна инверзија.



Сл.3.19. Подрачја на работа на MOS-структурата

Подрачје на акумулација Подрачјето на акумулација одговара на негативни вредности на V_s. Согласно со изразот (3.3.27), полнежот Q_s е позитивен и во основа е одреден со првиот член во средната заграда, па важи $Q_s \sim \exp(|V_s|/2U_T)$. Всушност, доаѓа до акумулација на празнини непосредно под слојот од SiO_2 - што е симболично прикажано на сликата 3.20-а. На сликата 3.20-б е прикажан, квалитативно, соодветниот зонски дијаграм на полупроводникот. Како што се гледа, во близината на површината се јавува искривување на енергетските зони нагоре (V_s е негативен) и, согласно со тоа, доаѓа до оддалечување на средината на забранетата енергетска зона од Фермиевото ниво. Тоа, од аспект на зонската теорија на полупроводниците, значи зголемување на концентрацијата на празнини во близината на површината (под оксидниот слој) - што е во согласност со погоре изнесеното.



Сл.3.20. Подрачје на акумулација

а) индукција на празнини на површината на полупроводникот

б) зонски дијаграм

Подрачје на осиромашување и слаба инверзија Подрачјето на осиромашување и слаба инверзија одговара на позитивни вредности на V_s што лежат меѓу 0 и $2V_{FE}$. Согласно со изразот (3.3.27), полнежот Q_s е негативен, а во основа ќе биде одреден со третиот член во средната заграда, т.е. ќе важи:

$$Q_s = -\sqrt{2q\varepsilon_s N_A U_T}\left(\frac{V_s}{U_T}\right)^{1/2} = -(2q\varepsilon_s N_A V_s)^{1/2} \qquad (3.3.28)$$

Всушност, доаѓа до истиснување на празнините од површинскиот слој, па полнежот Q_s се состои главно од полнежот на некомпензираните јонизирани акцепторски атоми. Слојот од кој се истиснати празнините е познат како осиромашен слој. Неговата дебелина x_d може лесно да се одреди ако се земе предвид дека исто така да важи:

$$Q_s = -qN_A x_d \qquad (3.3.29)$$

Така, од (3.3.28) и (3.3.29) следува:

$$x_d = \left(\frac{2\varepsilon_s V_s}{qN_A}\right)^{1/2} \qquad (3.3.30)$$

До резултатот (3.3.30) може да се дојде и со помош на релацијата (3.3.13) која во подрачјето $0<V<2V_{FE}$, согласно со(3.3.26) се сведува на:

$$-\frac{dV}{dx} \approx \frac{U_T}{L_{DE}}\sqrt{2}\left(\frac{V}{U_T}\right)^{1/2} \qquad (3.3.31)$$

По интегрирањето и внесувањето на почетниот услов $V=V_s$ за $x=0$, се добива:

$$V_s^{1/2} - V^{1/2} \doteq \sqrt{\frac{U_T}{2}} \frac{1}{L_{DE}} x \qquad (3.3.32)$$

Дебелината x_d е еднаква на она растојание x од површината на кое е V=0, па од (3.3.32) директно следува:

$$x_d = \frac{V_s^{1/2}}{\sqrt{\frac{U_T}{2}} \frac{1}{L_{DE}}} \qquad (3.3.33)$$

што, согласно со (3.3.25), е исто со (3.3.30).

Врз база на (3.3.33), распределбата на потенцијалот (3.3.32) може да се прикаже и во обликот:

$$V \doteq V_s \left(1 - \frac{x}{x_d}\right)^2 \qquad (3.3.34)$$

Како што произлегува од изразот (3.3.30), дебелината на осиромашениот слој ќе расте со квадратниот корен од V_s, па при $V_s = 2V_{FE}$ ќе ја достигне својата максимална вредност, т.е.

$$x_{dmax} = \left(\frac{4\varepsilon_s V_{FE}}{qN_A}\right)^{1/2} \qquad (3.3.35)$$

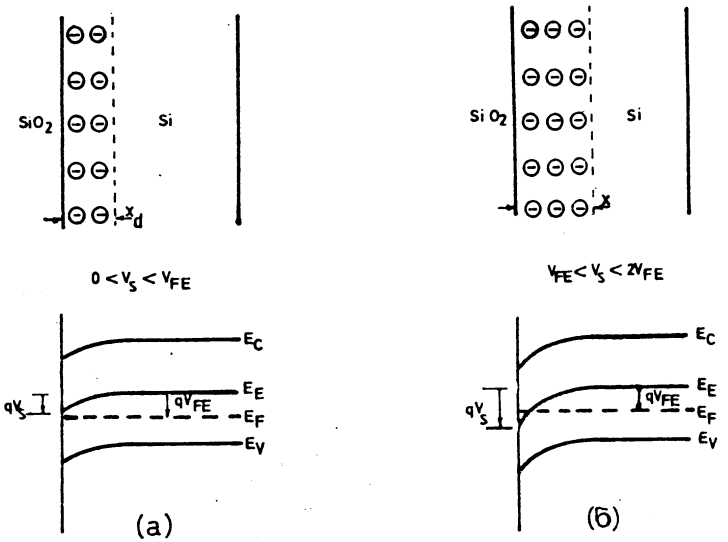
Тогаш, полнежот Q_s, согласно со (3.3.28), ќе биде даден со:

$$Q_s(2V_{FE}) = -(4q\varepsilon_s N_A V_{FE})^{1/2} \qquad (3.3.36)$$

Интересно е да се забележи дека x_{dmax} се намалува со растењето на N_A.

На сликата 3.21 е даден симболичен приказ на осиромашениот слој кај MOS-структурата за две различни вредности на V_s. Прикажани се, квалитативно, и соодветните зонски дијаграми. Сликата 3.21-а одговара на потподрачјето на осиромашување, т.е. на областа во која е $0<V_s<V_{FE}$, а сликата 3.21-б одговара на потподрачјето на слаба инверзија, т.е. на областа во која е $V_{FE}<V_s<2V_{FE}$. Во вториот случај, нивото на средината на забранетата енергетска зона - кое е над Фермиевото ниво во длабочината на полупроводникот - го сече Фермиевото ниво во близината на површината, т.е. станува пониско од него. Според зонската теорија, ова значи дека површинскиот слој на полупроводникот ќе го измени типот на проводноста. Така, во конкретниот случај, тој ќе добие карактер на

полупроводник од n-тип. Појавата на менување типот на проводноста под дејство на електрично поле е позната како инверзија, а слојот што се наоѓа во состојба на инверзија - како инверзен слој.



Сл.3.21. Подрачје на осиромашување и на слаба инверзија
а) потподрачје на осиромашување
б) потподрачје на слаба инверзија

Во подрачјето на осиромашување и слаба инверзија, учеството на слободните електрони во вкупниот индуциран полнеж е занемарливо мало во споредба со учеството на јонизираните акцепторски атоми. Ова може да се илустрира ако се претпостави дека распределбата на потенцијалот во полупроводникот е дадена со релацијата (3.3.34), што е практично и точно кога присуството на слободни носители на електрицитет во осиромашениот слој е занемарливо мало. Имено, согласно со (3.3.6), (3.3.17), (3.3.21) и (3.3.34), е:

$$n(x) \doteq N_A \exp\frac{-2V_{FE}}{U_T} \exp\left[\frac{V_s}{U_T}\left(1 - \frac{x}{x_d}\right)^2\right] \qquad (3.3.37)$$

Од горната релација произлегува дека концентрацијата на слободните електрони n во осиромашениот слој брзу се намалува со од-

далечувањето од површината и дека површинската концентрација $n_s=n(0)$ е занемарливо мала во однос на концентрацијата на акцепторските атоми N_A, освен за $V_s=2V_{FE}$ кога е $n_s=N_A$. Може да се покаже дека во овој граничен случај, при вообичаени вредности на N_A (т.е. на V_{FE}), на оддалеченост од површината која не е поголема од $0,1x_d$ концентрацијата на слободните електрони паѓа на само 1% од вредноста N_A.

Пример 3.16.

Пресметај ја максималната дебелина x_{dmax} на осиромашениот слој и соодветниот полнеж $Q_s(2V_{FE})$ кај некоја MOS-структура со $N_A=3\times10^{15}cm^{-3}$.

Решение

$$V_{FE} \doteq U_T \ell n \frac{N_A}{n_i} \doteq 26\times10^{-3} \ell n \frac{3\times10^{15}}{1,5\times10^{10}} \doteq 0,32\ V$$

$$x_{dmax} = \left(\frac{4\varepsilon_s V_{FE}}{qN_A}\right)^{1/2} \doteq \left(\frac{4\times11,8\times8,85\times10^{-14}\times0,32}{1,6\times10^{-19}\times3\times10^{15}}\right)^{1/2}$$

$$\doteq 0,53\times10^{-4}cm$$

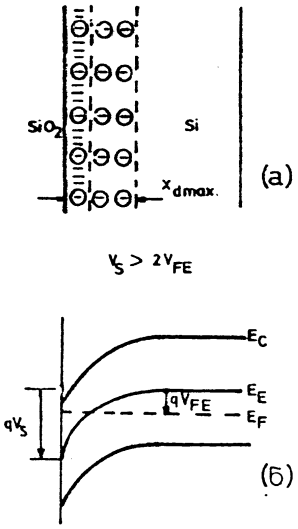
$$Q_s(2V_{FE}) \doteq -(4q\varepsilon_s N_A V_{FE})^{1/2}$$

$$\doteq -(4\times1,6\times10^{-19}\times11,8\times8,85\times10^{-14}\times3\times10^{15}\times0,32)^{1/2}$$

$$\doteq -2,53\times10^{-8}\ C\ cm^{-2}$$

Подрачје на силна инверзија Подрачјето на силна инверзија одговара на вредности на V_s што се поголеми од $2V_{FE}\doteq2U_T\ell n(N_A/n_i)$. Според релацијата (3.3.27), во ова подрачје е $Q_s \sim \exp(V_s/2U_T)$, бидејќи полнежот Q_s, кој е негативен, е одреден во основа со четвртиот член во средната заграда . Всушност, со растењето на V_s доаѓа до акумулација на слободни електрони во површинскиот слој на полупроводникот (сл.3.22-а). Концентрацијата на слободните електрони овде ја надминува концентрацијата на акцепторските атоми N_A и продолжува да расте експоненцијално со V_s, заштитувајќи го полупроводникот од натамошната пенетрација на полето. Затоа може да се смета

дека максималната можна пенетрација на полето во полупроводникот е практично идентична со дебелината на осиромашениот слој при $V_s=2V_{FE}$, дадена со релацијата (3.3.35). Од сликата 3.22-б е очигледно дека (како резултат на зголемувањето на напонот на металната електрода V_G) напонот V_s може да стане толкав што да дојде до пресечување на Фермиевото ниво со дното на проводната зона. Ако тоа се случи, површинскиот слој на полупроводникот ќе се претвори во псевдометал (дегенериран полупроводник) од n-тип, а површинскиот потенцијал V_s практично ќе престане да расте задржувајќи се на вредноста



Сл.3.22. Подрачје на силна инверзија

а) индукција на слободните електрони на површината на полупроводникот
б) зонски дијаграм

$$V_{smax} = \frac{E_G}{2q} + V_{FE} \qquad (3.3.38)$$

Во практичните случаи оваа максимална вредност на површинскиот потенцијал се движи од 0,6 до 1,0 V.

3.3.5. Праговен напон кај MOS-структурите [1]

Обично, како праговен напон кај MOS-структурите се дефинира оној напон на металната електрода при кој настанува силна инверзија на површината на полупроводникот, или со други зборови, при кој површинскиот потенцијал на полупроводникот прима вредност $V_s=2V_{FE}$. Значи, согласно со (3.3.24) и (3.3.18), ако праговниот напон се означи со V_{TH}, ќе важи:

$$V_{TH} = V_G\Big|_{V_s = 2V_{FE}}$$

$$= -\frac{Q_s(2V_{FE})+Q_{ss}}{C_{ox}} + 2V_{FE} + \phi_{ms}$$

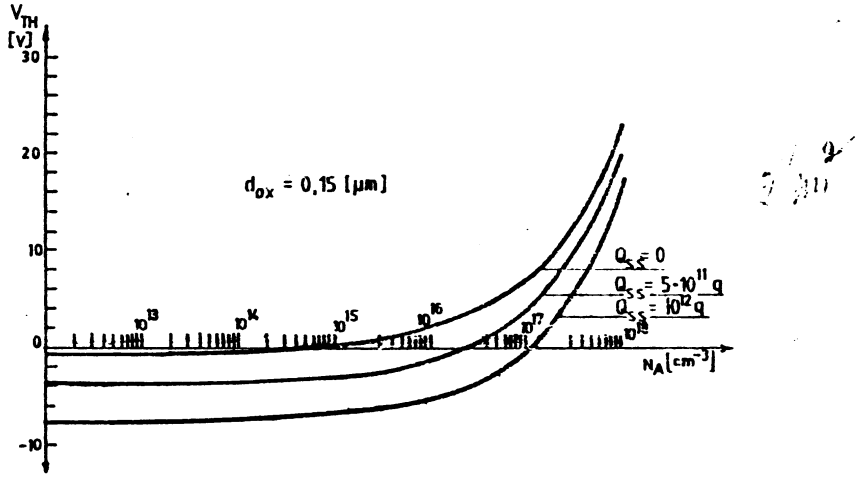
$$= -\frac{Q_s(2V_{FE})+Q_{ss}}{\varepsilon_{ox}} d_{ox} + V_{FE} + \left(\phi_m - \chi - \frac{E_G}{2q}\right) \qquad (3.3.39)$$

За MOS-структура со алуминиумска електрода и силициум како полупроводник е $\phi_m \doteq 4,30$ V, $\chi \doteq 4,35$ V, $E_G/2q \doteq 0,56$ V па важи:

$$V_{TH} \doteq -\frac{Q_S(2V_{FE})+Q_{SS}}{\varepsilon_{ox}} d_{ox} + V_{FE} - 0,61\,V \qquad (3.3.40)$$

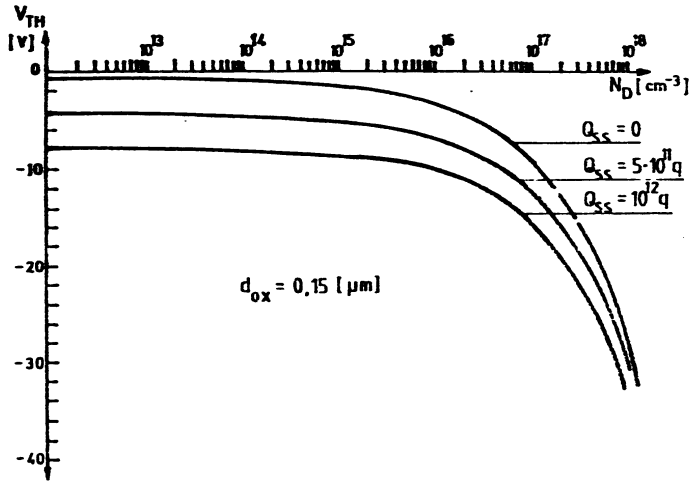
Изразите (3.3.39) и (3.3.40) важат како за MOS-структура со полупроводник од p-тип (n-канална MOS-структура) така и за MOS-структура со полупроводник од n-тип (p-канална MOS-структура). Во случај на n-канални MOS-структури, напонот V_{FE} е позитивен и е даден со релацијата (3.3.21), а полнежот $Q_S(2V_{FE})$ е негативен и е даден со релацијата (3.3.36).Во случај на p-канални MOS-структури, напонот V_{FE} е негативен и е даден со релацијата (3.3.22), а полнежот $Q_S(2V_{FE})$ е позитивен и е даден со изразот $Q_S(2V_{FE}) = (4q\varepsilon_S N_D |V_{FE}|)^{1/2}$. Површинскиот полнеж Q_{SS} не зависи од типот на проводноста и концентрацијата на примеси и секогаш е позитивен.

На сликите 3.23 и 3.24 е прикажана зависноста на праговниот напон од нето-примесната концентрација кај n-канална, односно кај p-канална MOS-структура со алуминиумска електрода и со дебелина на оксидниот SiO_2-слој $d_{ox}=0,15$ μm, при што како параметар се јавува површинскиот полнеж Q_{SS}. При пресметувањето на



Сл.3.23. Зависност на праговниот напон на n-каналната MOS-структура со алуминиумска електрода од нето-акцепторската концентрација

дијаграмите се користени следниве нумерички вредности: $n_i=1,5\times10^{10}$ cm^{-3}, $U_T=0,026$ V, $\varepsilon_S=11,8\,\varepsilon_o$ ($\varepsilon_o=8,85\times10^{-14}$ F/cm е диелектричката константа на вакуумот), $\varepsilon_{ox}=3,82\,\varepsilon_o$, $q=1,6\times10^{-19}$ As.



Сл.3.24. Зависност на праговниот напон на p-каналната MOS-структура со алуминиумска електрода од нето-донорската концентрација

Кај MOS-структурите со полупроводник од p-тип (сл.3.23) праговниот напон може да биде и негативен и позитивен. Тој е негативен при помали нето-акцепторски концентрации, а позитивен при поголеми нето-акцепторски концентрации. Значи, MOS-структурите со полупроводник од p-тип можат директно да се користат за реализација и на n-канални MOS-структури со вграден канал и на n-канални MOS-структури со индуциран канал. Реализацијата на n-канални MOS-структури со однапред зададен позитивен праговен напон (типична барана вредност е, на пример, $V_{TH}=1,0$ V) претставува деликатен проблем, бидејќи праговниот напон во ова подрачје се карактеризира со голема зависност од нето-акцепторската концентрација N_A и површинскиот полнеж Q_{SS} (кој се јавува како паразитен и, според тоа, како тешко контролабилен). Токму овие тешкотии, чие надминување беше можно само со натамошно усовршување на постојната технологија, беа основната причина поради

која NMOS-интегралните кола се појавија во дигиталната електроника подоцна отколку PMOS.

Кај MOS-структурите со полупроводник од n-тип (сл.3.24), праговниот напон може да биде само негативен. Од соодветниот дијаграм се гледа дека постои голема зависност меѓу праговниот напон и површинскиот полнеж Q_{ss} и дека само со значајно намалување на полнежот Q_{ss} може да се постигне праговен напон помал (по апсолутна вредност), од 2 V каков што во практиката најчесто се бара. Токму затоа, во текот на развојот на PMOS-технологијата беа вложени големи напори во правец на намалување на полнежот Q_{ss}, кои вродија со плод особено во моментот кога беше забележано дека Q_{ss} во голема мерка зависи од кристалната ориентација. Фактот што кај MOS-структурите со алуминиумска електрода и силициум од n-тип праговниот напон може да биде само негативен не треба да се сфати како знак дека не е можна реализација на p-канален MOS-транзистор со вграден.канал. Имено, такви транзистори постојат, а се остваруваат на тој начин што во подрачјето на каналот, т.е. меѓу p^+-слоевите на сорсот и дрејнот, се поставува тенок p-слој, добиен обично со помош на техниката на јонска имплантација.

Пример 3.17.

Пресметај го праговниот напон V_{TH} кај (а) дадена MOS-структура со златна електрода и силициум од p-тип и кај (б) дадена MOS-структура со алуминиумска електрода и силициум од n-тип, ако двете MOS-структури имаат иста нето-примесна концентрација $N_n=N_A=N_D=5,4\text{x}10^{15}\text{cm}^{-3}$, иста плоштинска густина на површинскиот полнеж $Q_{ss}=5\text{x}10^{-8}\text{C cm}^{-2}$ и иста дебелина на SiO_2-изолацијата $d_{ox}=0,1\ \mu\text{m}$.

Решение

а) Врз основа на дадените податоци се добива:

$$V_{FE} \doteq U_T \ln \frac{N_A}{n_i} \doteq 0,026 \ln \frac{5,4\text{x}10^{15}}{1,5\text{x}10^{10}} = 0,33\ \text{V}$$

$$Q_s(2V_{FE}) \doteq -(4q_s\varepsilon_s N_A V_{FE})^{1/2}$$

$$\doteq -(4\text{x}1,6\text{x}10^{-19}\text{x}11,8\text{x}8,85\text{x}10^{-14}\text{x}5,4\text{x}10^{15}\text{x}0,33)^{1/2}$$

$$\doteq -3,45\text{x}10^{-8}\text{C cm}^{-2}.$$

Имајќи предвид дека работната функција на златото е ϕ_m =4,80 V(табела 3.1) и дека константата на афинитетот кај силициумот изнесува χ=4,35 V, наоѓаме:

$$V_{TH} = -\frac{Q_s(2V_{FE})+Q_{ss}}{\varepsilon_{ox}} d_{ox}+V_{FE}+(\phi_m-\chi-\frac{E_G}{2q})$$

$$\doteq -\frac{-3,45\text{x}10^{-8}+5\text{x}10^{-8}}{3,82\text{x}8,85\text{x}10^{-14}} \text{x}0,1\text{x}10^{-4}+0,33+(4,80-4,35-0,56)$$

$$\doteq -0,24\ \text{V}$$

б) Врз основа на дадените податоци се добива:

$$V_{FE} \doteq U_T \ln \frac{n_i}{N_D} \doteq -0,33\,\text{V}$$

$$Q_s(2V_{FE}) \doteq (4q\varepsilon_s N_D |V_{FE}|)^{1/2} \doteq 3,45\text{x}10^{-8}\text{C cm}^{-2}.$$

а, согласно со (3.3.40):

$$V_{TH} \doteq -\frac{Q_s(2V_{FE})+Q_{ss}}{\varepsilon_{ox}} d_{ox}+V_{FE}-0,61\,\text{V}$$

$$\doteq -\frac{3,45\text{x}10^{-8}+5\text{x}10^{-8}}{3,82\text{x}8,85\text{x}10^{-14}} \text{x}0,1\text{x}10^{-4}-0,33-0,61 \doteq -3,44\,\text{V}$$

3.4. Факторот β кај интегралните npn-транзистори [1,4,5]

3.4.1. Воведни забелешки

Факторот на струјното засилување на биполарниот транзистор за спој со заедничка база е даден со изразот:

$$\alpha = \gamma\alpha_T \qquad (3.4.1)$$

каде што γ е факторот на инјекција на емитерот, а α_T е транспортниот фактор. За npn-транзисторот, γ и α_T се дефинирани како што следува:

$$\gamma = \frac{I_{nE}}{I_{nE}+I_{pE}}\Big|_{V_{CB}=0} \qquad (3.4.2)$$

$$\alpha_T = \frac{I_C}{I_{nE}}\Big|_{V_{CB}=0} \qquad (3.4.3)$$

Овде I_{nE} е електронската, а I_{pE} е празнинската компонента на струјата на емитерот. I_C е колекторската струја. V_{CB} е напонот меѓу колекторот и базата.

Кај современите интегрални npn-транзистори базата е толку тенка, во споредба со дифузната должина на електроните, што може да се занемари рекомбинацијата во неа, т.е. да се смета дека транспортниот фактор α_T е еднаков на единица. Во такви услови важи $\alpha \doteq \gamma$, па, согласно со (3.4.2), факторот на струјното засилување за спој со заеднички емитер ќе биде даден со изразот:

$$\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha} \doteq \frac{\gamma}{1-\gamma} = \frac{I_{nE}}{I_{pE}}\Big|_{V_{CB}=0} \qquad (3.4.4)$$

Во случајот на еднодимензионална геометрија, која кај интегралните npn-транзистори може сосем оправдано да се користи (планарните димензии на емитерот се многу поголеми од неговата дебелина па страничните ефекти се занемарливи), изразот (3.4.4) се сведува на:

$$\beta \doteq \frac{J_n(0)}{J_p(0)}\Big|_{V_{CB}=0} \qquad (3.4.5)$$

каде што $J_n(0)$ е густина на електронската струја при базниот раб на емитерското преодно подрачје, а $J_p(0)$ е густина на празнинската струја при емитерскиот раб на емитерското преодно подрачје.

Од основната теорија на транзисторите е познато дека при претпоставка на униформна легираност на подрачјата на базата и емитерот (сл.3.25-а) и дебелина на емитерот неколку

пати поголема од дифузната должина на спореднитe носители во него (дебел емитер), важи:

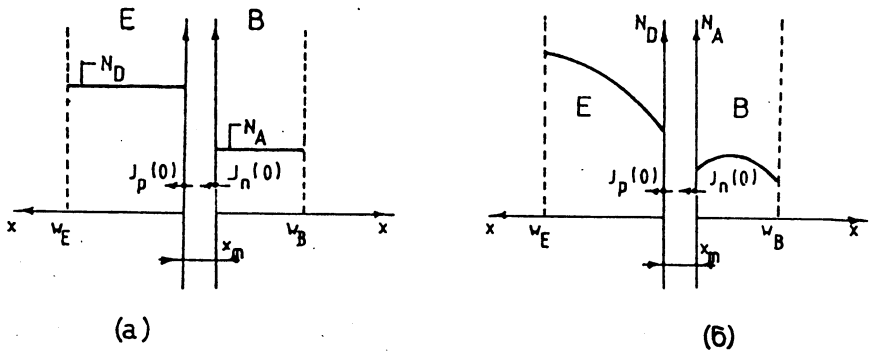
$$J_n(0) \doteq \frac{qD_n n_{io}^2}{w_B N_A}\left(\exp\frac{V_{BE}}{U_T}-1\right) \qquad (3.4.6)$$

$$J_p(0) \doteq \frac{qD_p n_{io}^2}{L_p N_D}\left(\exp\frac{V_{BE}}{U_T}-1\right) \qquad (3.4.7)$$

и дека, според тоа, согласно со (3.4.5), е:

$$\beta \doteq \frac{N_D D_n L_p}{N_A D_p w_B} \qquad (3.4.8)$$

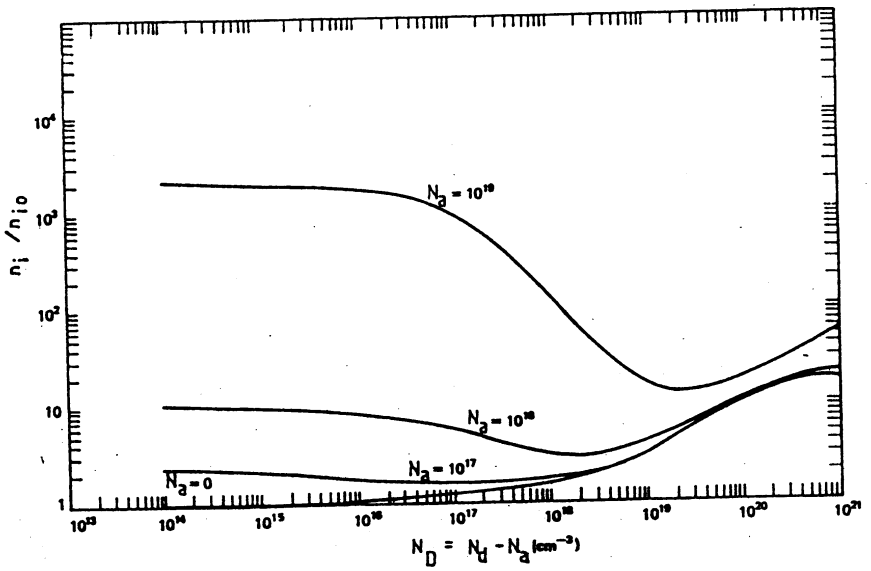
Овде, D_n е дифузниот коефициент на електроните во базата, а D_p е дифузниот коефициент на празнините во емитерот. N_A е нето-акцепторската концентрација во базата, а N_D е нето-донорската концентрација во емитерот. Величината w_B е активната дебелина на базата, а L_p е дифузната должина на празнините во емитерот. Со n_{io} е означена интринсичната концентрација на силициумот. V_{BE} е напонот меѓу базата и емитерот.



Сл.3.25. Примесни профили на емитерот и базата кај униформно легиран транзистор (а) и неуниформно легиран (интегрален) транзистор (б)

Се разбира, изразите (3.4.6) и (3.4.7) се неприменливи за интегралниот npn-транзистор. Кај него, при одредувањето на соодветните изрази $J_n(0)$ и $J_p(0)$ ќе треба да се имаат предвид

не само зависностите на N_A и N_D од x (види ја сликата 3.25-б) туку и зависностите на D_n и D_p (значи и на L_p) од тоталната концентрација на примеси во соодветните подрачја (сл.3.7), т.е. повторно од x. И не само тоа. Значајно влијание врз вредноста на $J_p(0)$ имаат дегенеративните ефекти во емитерот кои се манифестираат како зголемување на интринсичната концентрација со зголемувањето на примесната концентрација. Имено, експериментално е утврдено дека кај дегенерираните полупроводници,т.е. кај полупроводниците со многу големи концентраций на примеси, каков што е емитерот, интринсичната концентрација n_i е поголема отколку интринсичната концентрација n_{io} кај недегенерираните полупроводници. Овој факт се објаснува со ефективното намалување на ширината на забранетата енергетска зона поради преклопувањето на донорското и/или акцепторското ниво во тесна донорска односно акцепторска зона. Зголемувањето на интринсичната концентрација со зголемување на примесната концентрација почнува да доаѓа до израз при концентрации поголеми од $10^{17}cm^{-3}$.



Сл.3.26. Зависност на ефективната интринсична концентрација,нормирана со интринсичната концентрација на недегенериран полупроводник,од нето-донорската концентрација. Како параметар се јавува акцепторската концентрација

На сликата 3.26 е дадена зависноста на интринсичната концентрација од нето-донорската концентрација, при што како параметар се јавува акцепторската концентрација.

3.4.2. Транспортни равенки на споредните носители во базата и емитерот на npn-транзисторот

За густината на електронската струја во базата, во насока од колекторот кон емитерот, важи релацијата (види ја сликата 3.25):

$$J_n = -qD_n \frac{dn}{dx} + q\mu_n n \frac{d\psi}{dx} \qquad (3.4.9)$$

Овде D_n е дифузниот коефициент, μ_n е подвижноста, а n е концентрацијата на електроните. Величината ψ е внатрешниот потенцијал,па $-d\psi/dx$ е внатрешното поле. Во рамнотежни услови електронската струја во базата мора да биде еднаква на нула, па равенката (3.4.9) тогаш ќе гласи:

$$0 = -qD_n \frac{dn_o}{dx} + q\mu_n n_o \frac{d\psi}{dx} \qquad (3.4.10)$$

каде што n_o е рамнотежната концентрација на електроните во базата. Од изразот (3.4.10) следува:

$$-\frac{d\psi}{dx} = -\frac{D_n}{\mu_n}\frac{1}{n_o}\frac{dn_o}{dx} \qquad (3.4.11)$$

Согласно со законот за термодинамичка рамнотежа, имаме:

$$n_o = \frac{n_{io}^2}{p_o} \approx \frac{n_{io}^2}{N_A} \qquad (3.4.12)$$

Овде p_o и N_A се рамнотежната празнинска концентрација и нето-акцепторската концентрација во базата. Нето-акцепторската концентрација N_A е дадена со изразот:

$$N_A = N_B - N_E - N_{BC} \qquad (3.4.13)$$

каде што N_B е акцепторската концентрација добиена со базната дифузија, N_E е донорската концентрација добиена со емитерската дифузија и N_{BC} е донорската концентрација на епитаксијалниот слој. Врз основа на (3.4.11) и (3.4.12), за јачината на електричното поле во базата се добива:

$$-\frac{d\psi}{dx} \doteq \frac{D_n}{\mu_n}\frac{1}{N_A}\frac{dN_A}{dx} \qquad (3.4.14)$$

Треба да се забележи дека, согласно со обликот на $N_A(x)$ (сл.3.25-б) полето во непосредната близина на емитерското преодно подрачје ќе биде насочено од емитерот кон колекторот, а во другиот дел на базата - од колекторот кон емитерот.

Во услови на ниска инјекција, т.е. кога концентрацијата на ексцесните електрони во базата е мала во споредба со концентрацијата на основните носители (т.е. празнините), во базата нема да настане промена во јачината на внатрешното поле, па релацијата (3.4.14) сè уште ќе важи. Според тоа, комбинирајќи ја релацијата (3.4.9) со релацијата (3.4.14), се добива следнава врска меѓу густината на електронската струја и концентрацијата на електроните во базата:

$$J_n \doteq -qD_n\frac{dn}{dx} - qD_n\frac{n}{N_A}\frac{dN_A}{dx} \qquad (3.4.15)$$

Релацијата (3.4.15) е позната како транспортна равенка на споредните носители во базата на npn-транзисторот.

За густината на празнинската струја во емитерот, во насока од колекторот кон емитерот, важи релацијата (види ја сликата 3.25):

$$J_p = -qD_p\frac{dp}{dx} - q\mu_p p\frac{d\psi}{dx} \qquad (3.4.16)$$

Овде D_p е дифузниот коефициент, μ_p е подвижноста, а p е концентрацијата на празнините. Во рамнотежна состојба празнинската струја на емитерот мора да биде еднаква на нула, па релацијата (3.4.16) тогаш ќе гласи:

$$0 = -qD_p\frac{dp_o}{dx} - q\mu_p p_o\frac{d\psi}{dx} \qquad (3.4.17)$$

каде што p_o е рамнотежната концентрација на празнините во емитерот. Од изразот (3.4.17) произлегува дека електричното поле во емитерот е дадено со:

$$-\frac{d\psi}{dx} = \frac{D_p}{\mu_p}\frac{1}{p_o}\frac{dp_o}{dx} \qquad (3.4.18)$$

Согласно со законот за термодинамичка рамнотежа, важи релацијата:

$$p_o = \frac{n_i^2}{n_o} \doteq \frac{n_i^2}{N_D} = \frac{n_{io}^2}{N_{D,ef}} \qquad (3.4.19)$$

каде што n_o е рамнотежната концентрација на електроните, n_i е интринсичната концентрација (која е функција од x бидејќи и степенот на дегенерираност на емитерот е функција од x), N_D е нето-донорската концентрација, т.е.

$$N_D = N_E + N_{BC} - N_B, \qquad (3.4.20)$$

n_{io} е интринсичната концентрација на недегенериран полупроводник, а

$$N_{D,ef} = N_D(x)\left(\frac{n_{io}}{n_i}\right)^2 \qquad (3.4.21)$$

т.н. ефективна нето-донорска концентрација на емитерот. Комбинирајќи ги (3.4.18) и (3.4.19), за јачината на електричното поле во емитерот се добива:

$$-\frac{d\psi}{dx} \doteq -\frac{D_p}{\mu_p}\frac{1}{N_{D,ef}}\frac{dN_{D,ef}}{dx} \qquad (3.4.22)$$

Од изразите (3.4.22) и (3.4.16) произлегува дека во услови на ниска инјекција празнинската струја и концентрацијата на празнини во емитерот ќе ја задоволуваат релацијата:

$$J_p \doteq -qD_p\frac{dp}{dx} - qD_p\frac{p}{N_{D,ef}}\frac{dN_{D,ef}}{dx} \qquad (3.4.23)$$

Релацијата (3.4.23) е позната како транспортна равенка на споредните носители во емитерот на npn-транзисторот. Таа е идентична по обликот со релацијата (3.4.15), што можеше и да се очекува. Единствената разлика е таа што овде наместо нето-акцепторската концентрација на базата фигурира ефективната нето-донорска концентрација на емитерот.

3.4.3. Израз за факторот β

Ако релацијата (3.4.15) се подели со $-qD_n$, се добива:

$$\frac{dn}{dx} + n\,\frac{1}{N_A}\,\frac{dN_A}{dx} \doteq -\frac{J_n}{qD_n} \qquad (3.4.24)$$

Диференцијалната равенка (3.4.24) е од обликот

$$\frac{dn}{dx} + f(x)n \doteq q(x) \qquad (3.4.25)$$

со општо решение

$$n \doteq e^{-\int f(x)dx}\left(C+\int_o^x q(x)e^{\int f(x)dx}dx\right) \qquad (3.4.26)$$

каде што C е интеграциона константа. Внесувајќи во (3.4.26) $f(x) = (dN_A/dx)/N_A$ и $q(x) = -J_n/qD_n$, се добива:

$$n \doteq \frac{1}{N_A}\left(C - \frac{1}{q}\int_o^x \frac{N_A}{D_n}\,J_n dx\right) \qquad (3.4.27)$$

Во случајот $V_{CB}=0$, кога, согласно со законот на pn-спој, при базниот раб на колекторското преодно подрачје, т.е. при $x=w_B$, е задоволен условот:

$$n(w_B) = n_o(w_B) \doteq \frac{n_{io}^2}{N_A(w_B)} \qquad (3.4.28)$$

релацијата (3.4.27) се сведува на:

$$n \doteq \frac{n_{io}^2}{N_A}\left(1+\frac{1}{qn_{io}^2}\int_x^{w_B}\frac{N_A}{D_n}\,J_n dx\right) \qquad (3.4.29)$$

Последниот израз може да се напише и во обликот:

$$n \doteq \frac{n_{io}^2}{N_A}\left(1+\frac{J_n(0)}{qn_{io}^2}\int_x^{w_B}\frac{N_A}{D_n}\,g_B(x)dx\right) \qquad (3.4.30)$$

каде што е:

$$g_B(x) = \frac{J_n(x)}{J_n(0)} \qquad (3.4.31)$$

Величината $g_B(x)$ е позната како <u>тежински или рекомбинационен фактор на базата</u>.

При базниот раб на емитерското преодно подрачје, т.е. за x=0, согласно со (3.4.30), се добива:

$$n(0) \doteq \frac{n_{io}^2}{N_A(0)}\left(1+\frac{J_n(0)}{qn_{io}^2}\int_o^{w_B}\frac{N_A}{D_n}\,g_B(x)dx\right) \qquad 3.4.32)$$

Но, од друга страна, согласно со законот на pn-спој, имаме:

$$n(0) \doteq \frac{n_{io}^2}{N_A(0)}\exp\frac{V_{BE}}{U_T}\,, \qquad (3.4.33)$$

па со израмнување на десните страни на (3.4.32) и (3.4.33), се добива:

$$J_n(0) \doteq \frac{qn_{io}^2}{G_B}\left(\exp\frac{V_{BE}}{U_T}-1\right) \qquad (3.4.34)$$

каде што е:

$$G_B = \int_o^{w_B}\frac{N_A}{D_n}\,g_B(x)dx \qquad (3.4.35)$$

Величината G_B е позната како <u>Гамелов број на базата</u>. Како што беше речено погоре, кај современите интегрални npn-транзистори базата е толку тенка што практично нема рекомбинациони процеси во неа, па тежинскиот факот $g_B(x)$ е еднаков на единица за секое $0<x<w_B$. Според тоа, Гамеловиот број на базата кај интегралните npn-транзистори е практично даден со:

$$G_B \doteq \int_o^{w_B}\frac{N_A}{D_n}\,dx \qquad (3.4.36)$$

Аналогно, при претпоставката дека концентрацијата на празнини на површината на емитерот, т.е. за $x=w_E$, е еднаква на рамнотежната концентрација, т.е.:

$$p(w_E) \doteq \frac{n_i^2(w_E)}{N_D(w_E)} = \frac{n_{io}^2}{N_{D,ef}(w_E)} \qquad (3.4.37)$$

за густината на празнинската струја на емитерот на местото x=0 ќе важи изразот:

$$J_p(0) \doteq \frac{qn_{io}^2}{G_E}\left(\exp\frac{V_{BE}}{U_T}-1\right) \qquad (3.4.38)$$

каде што е

$$G_E = \int_0^{W_E} \frac{N_{D,ef}}{D_p}\, g_E(x)dx \qquad (3.4.39)$$

Гамелов број на емитерот, а

$$g_E(x) = \frac{J_p(x)}{J_p(0)} \qquad (3.4.40)$$

тежински или рекомбинационен фактор на емитерот. Претпоставката (3.4.37) е исполнета кај транзисторите со дебел емитер, т.е. кај оние транзистори кај кои дебелината на емитерот е доволно голема за да може да се смета дека сите инјектирани празнини во емитерот се рекомбинираат пред да стигнат до неговата површина. Повеќето интегрални npn-транзистори спаѓаат во категоријата на транзистори со дебел емитер. Исклучок се транзисторите во ECL-логичките кола и во колата со многу висок степен на интеграција. Овие случаи се опфатени со поопштиот третман на оваа проблематика даден во [1].

За да се пресмета Гамеловиот број на емитерот потребно е, освен зависностите $N_{D,ef}(x)$ и $D_p(x)$, да се познава и зависноста $g_E(x)$. До неа може да се дојде преку примена на равенката на континуитетот на празнините во емитерското подрачје.

По нумерички пат е покажано дека кај интегралните npn-транзистори факторот $g_E(x)$ може да се апроксимира со изразот:

$$g_E(x) = \exp\left[-\left(\frac{x}{1{,}096\ L_{p,ef}}\right)^4\right] \qquad (3.4.41)$$

Овде, величината $L_{p,ef}$ е позната како ефективна дифузна должина на празнините во емитерот. Таа варира од транзистор до транзистор, во зависност од примесниот профил на емитерот. Ако во

изразот (3.4.41) се стави $x=L_{p,ef}$, се добива $g_E(L_{p,ef})=0{,}5$. Според тоа, ефективната дифузна должина на празнините во емитерот е дефинирана како онаа оддалеченост во емитерот мерена од емитерскиот раб на емитерското преодно подрачје за која густината на струјата на празнини паѓа на половина од густината на струјата на празнини инјектирани од базата во емитерот. На местото $x=2L_{p,ef}$ е $g_E(2L_{p,ef}) \doteq 1.53\times10^{-5}$, така што може да се смета дека тука J_p е занемарливо мал во споредба со $J_p(0)$. Тоа практично значи дека врз Гамеловиот број на емитерот немаат влијание примесите во емитерот што се оддалечени од емитерскиот раб на емитерското преодно подрачје повеќе од $2L_{p,ef}$. На сликата 3.27 е прикажан обликот на тежинскиот фактор $g_E(x)$ и на профилот $N_{D,ef}/D_p$ кај еден реален npn-транзистор. На истата слика е претставена и величината $N_{D,ef}g_E(x)/D_p$, која всушност е подинтегралната функција во изразот (3.4.39).

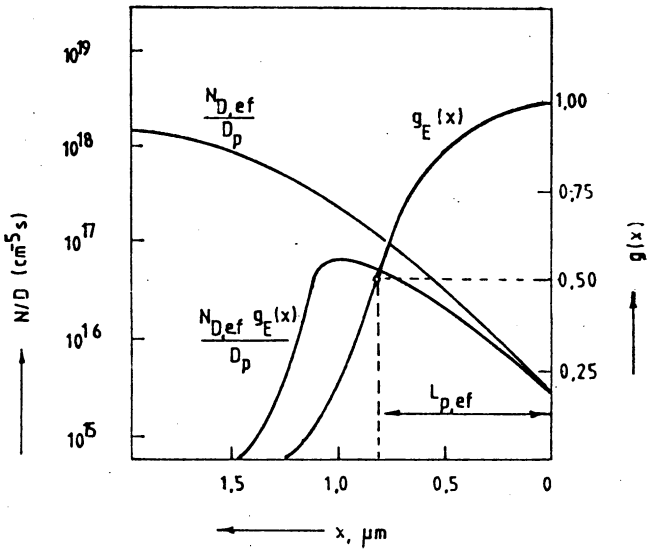
Согласно со (3.4.5), (3.4.34), (3.4.38), (3.4.36) и (3.4.39), е:

$$\beta \doteq \frac{G_E}{G_B} \doteq \frac{\int_0^{W_E} \frac{N_{D,ef}(x)}{D_p(x)}\, g_E(x)dx}{\int_0^{W_B} \frac{N_A(x)}{D_n(x)}\, dx} \qquad (3.4.42)$$

Лесно се покажува дека изразот (3.4.8) е само посебен случај на изразот (3.4.42), ако се има предвид дека кај униформно легираниот транзистор е $g_E(x)=e^{-x/L_p}$.

При проектирањето на факторот β, Гамеловиот број на базата G_B има многу позначајна улога отколку Гамеловиот број на емитерот G_E. Тоа произлегува оттаму што врз вредноста на Гамеловиот број на базата може да се влијае во широки граници, преку менување на дебелината на базата w_B, односно на профилот на нејзината примесна концентрација $N_A(x)$, што не е случај со вредноста на Гамеловиот број на емитерот. Имено, ако го зголемиме $N_D(x)$, со цел да го зголемиме G_E, навистина ќе дојде до зголемување на $N_{D,ef}/D_p$, но истовремено ќе дојде и до намалување на

$L_{p,ef}$, така што G_E нема битно да се промени. Ова е и причината што кај најголемиот број интегрални npn-транзистори со дебел емитер Гамеловиот број G_E се наоѓа во тесните граници од $2x10^{13}$ до $9x10^{13} cm^{-4}s$.



Сл.3.27. Приказ на тежинскиот фактор $g_E(x)$, профилот $N_{D,ef}/D_p$ и подинтегралната функција во изразот за Гамеловиот број на емитерот

3.4.4. Приближно одредување на Гамеловиот број на базата

На сликата 3.28 е даден примесниот профил на еден интегрален npn-транзистор. Со x_{jE} е означена длабочината на pn-спојот емитер-база, а со x_{jC} - длабочината на pn-спојот колектор-база. Координатите x_{EB} и x_{CB} ги означуваат положбите на базните рабови на емитерското и колекторското преодно подрачје, така што $x_{CB}-x_{EB}$ е активната дебелина на базата.

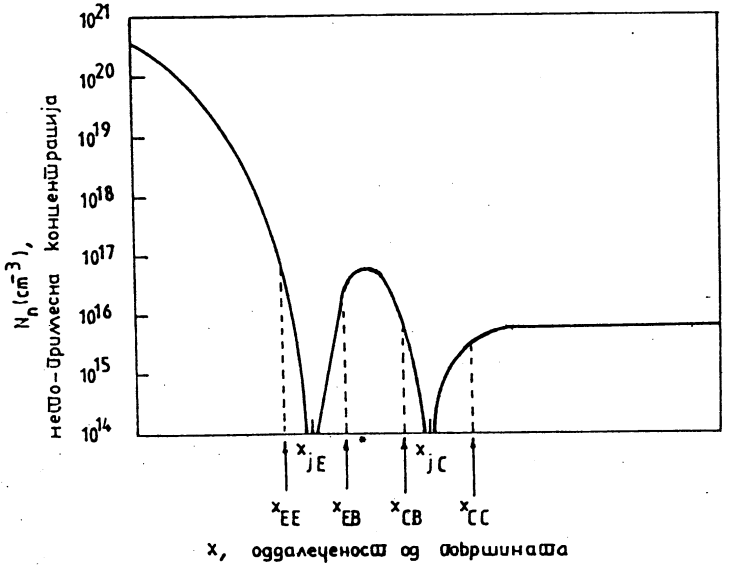
Согласно со (3.4.36), Гамеловиот број на базата ќе биде даден со изразот:

$$G_B \doteq \int_{x_{EB}}^{x_{CB}} \frac{N_A}{D_n}\, dx \qquad (3.4.43)$$

За да се овозможи аналитичко одредување на вредноста на интегралот (3.4.43), вообичаено е дифузниот коефициент D_n, кој зависи од положбата x, да се замени со еден ефективен (просечен) дифузен коефициент $\tilde{D}_n$. Тогаш релацијата (3.4.43) поминува во:

$$G_B \doteq \frac{1}{\tilde{D}_n} \int_{x_{EB}}^{x_{CB}} N_A dx \qquad (3.4.44)$$

Вредноста на ефективниот дифузен коефициент $\tilde{D}_n$ се одредува со помош на дијаграмот на сликата 3.7. Имено, таа се израмнува со онаа вредност на дифузниот коефициент на слободните електрони што одговара на тотална примесна концентрација $N_t=N_B(x_{EB})/2$, каде што $N_B(x)$ е профилот на акцепторската концентрација од базната дифузија.



Сл.3.28. Примесен профил на интегрален npn-транзистор со ознаки на карактеристичните растојанија од површината

Со оглед на големата стрмнина на профилот на емитерската дифузија N_E во близината на емитерскиот pn-спој, нето-акцепторската концентрација во активниот дел од базата N_A ќе биде практично одредена само со профилот на базната дифузија N_B и со

донорската концентрација на епитаксијалниот слој N_{BC}. Ако се претпостави дека профилот на базната дифузија е Гаусов, може да се напише:

$$N_A \doteq N_B - N_{BC} = N_{sB}\exp\frac{-x^2}{4L^2} - N_{BC} \qquad (3.4.45)$$

каде што N_{sB} и L се површинската концентрација и карактеристичната должина на базната дифузија.

Со внесување на (3.4.45) во (3.4.44) се добива:

$$G_B \doteq \frac{1}{\tilde{D}_n}\int_{x_{EB}}^{x_{CB}}\left(N_{sB}\exp\frac{-x^2}{4L^2} - N_{BC}\right)dx$$

$$= \frac{1}{\tilde{D}_n}\{\sqrt{\pi}\,LN_{sB}[\mathrm{erf}(t_2)-\mathrm{erf}(t_1)]-(x_{CB}-x_{EB})N_{BC}\} \qquad (3.4.46)$$

каде што е:

$$t_1 = \frac{x_{EB}}{2L}\ , \qquad t_2 = \frac{x_{CB}}{2L} \qquad (3.4.47)$$

Пример 3.18.

Длабочините на колекторскиот и емитерскиот pn-спој кај некој npn-транзистор се: x_{jC}=1,45 μm и x_{jE}=0,67 μm. Примесната нето-донорската концентрација на епитаксијалниот слој изнесува $N_{BC}=8\times10^{15}cm^{-3}$, а површинската концентрација на базната дифузија $N_{sB}=4\times10^{18}cm^{-3}$. Со помош на Лоренс-Ворнеровите криви е утврдено дека дебелината на базниот дел од колекторското преодно подрачје изнесува $x_{jC}-x_{CB}\doteq0,19$ μm. Проценето е дека дебелината на базниот дел од емитерското преодно подрачје има вредност $x_{EB}-x_{jE}=0,10$ μm. Треба да се одреди Гамеловиот број на базата.

Решение

Од дадените податоци произлегува:

$$x_{CB} \doteq x_{jC}-0,19 = 1,26\ \mu m$$

$$x_{EB} \doteq x_{jE}+0,10 = 0,77\ \mu m$$

$$x_{CB} - x_{EB} \doteq 0,49\ \mu m$$

Со оглед на тоа што мора да важи:

$$N_{sB}\exp\frac{-x_{jC}^2}{4L^2} \doteq N_{BC}$$

излегува:

$$L \doteq \frac{x_{jC}}{2\left(\ln\frac{N_{sB}}{N_{BC}}\right)^{1/2}} \doteq 0,29\ \mu m$$

па, согласно со (3.4.47), се добива:

$$t_1 \doteq 1,33$$

$$t_2 \doteq 2,17$$

Пресметуваме:

$$\frac{N_B(x_{EB})}{2} = \frac{N_{sB}}{2}\exp\frac{-x_{EB}^2}{4L^2} \doteq 3,4\times10^{17}cm^{-3}$$

па, од сликата 3.7, отчитуваме:

$$\tilde{D}_n = D_n\Big|_{N_t=N_B(x_{EB})/2} \doteq 11\ cm^2/s$$

Конечно, согласно со (3.4.46), се добива:

$$G_B \doteq \frac{1}{11}\{\sqrt{\pi}\times0,29\times10^{-4}\times4\times10^{18}[\mathrm{erf}(2,17)-\mathrm{erf}(1,33)] - 0,49\times10^{-4}\times8\times10^{15}\}$$

$$\doteq 1,06\times10^{12}cm^{-4}s$$

4. ЕЛЕМЕНТИ НА МОНОЛИТНИТЕ ИНТЕГРАЛНИ КОЛА

4.1. Некои општи карактеристики на елементите на монолитните интегрални кола [1,2]

Основна одлика на елементите на монолитните интегрални кола (монолитни интегрални елементи), во споредба со елементите на дискретните кола (дискретни елементи), е нивната поставеност во заедничка подлога. Поставеноста во заедничка подлога имплицира електрична поврзаност на некои од електродните подрачја на овие елементи со подлогата. Затоа, математичките модели (еквивалентните шеми) на монолитните интегрални елементи се разликуваат во одредена мерка од моделите на соодветните дискретни елементи.

Друга важна особеност на монолитните интегрални елементи е таа што бројот на степените на слобода при нивното изготвување е помал отколку кај соодветните дискретни елементи. Ова е директна последица на барањето сите елементи на дадено монолитно интегрално коло да се добиваат истовремено, во единствен технолошки циклус. Имено, при проектирањето на интегралните елементи може слободно да се оперира само со нивната планарна конфигурација, а не и со дебелината, односно електрофизичките параметри на нивните слоеви. Така, на пример, при димензионирањето на монолитните отпорници може да се варира нивната широчина или должина, но не и нивната слојна отпорност - која е одредена со базната или емитерската дифузија, зависно од структурата на отпорникот.

Кај монолитните интегрални кола најквалитетен елемент е основниот елемент (т.е. биполарниот npn-транзистор кај биполарните интегрални кола, NMOS-транзисторот со индуциран канал кај NMOS-интегралните кола, PMOS-транзисторот со индуциран канал кај PMOS-интегралните кола), а другите елементи имаат просечни,

па дури и лоши карактеристики. Тоа е затоа што постапките што се применуваат при реализацијата на интегралните кола се оптимизирани, главно, само во однос на основниот елемент.

Со оглед на тоа што транзисторите, во општ случај, бараат помала плоштина и имаат значително подобри карактеристики отколку пасивните елементи, во монолитната техника се оди кон што е можно поголема супституција на пасивните елементи со транзистори, т.е. кон решенија со голем број транзистори, а мал број пасивни елементи. Всушност, постојат монолитни интегрални кола составени само од транзистори. Тоа, во прв ред, се однесува на дигиталните кола во NMOS-,PMOS-,CMOS- и I^2L-техника. NMOS-колата се базирани врз NMOS-тразистори со индуциран, односно со вграден канал. PMOS-колата се базирани врз PMOS-транзистори со индуциран, односно со вграден канал. CMOS-колата се составени од парови на NMOS- и PMOS-транзистори со индуциран канал. I^2L-колата се составени од npn- и pnp-транзистори.

Во текот на развојот на микроелектрониката, во монолитната техника се појавија елементи кои немаат свои аналози во дискретната техника. Такви елементи се, на пример, многуемитерскиот транзистор, многуколекторскиот транзистор и други.

Толеранциите на апсолутните износи на електричните параметри кај интегралните елементи се прилично големи - поголеми отколку кај дискретните елементи. Меѓутоа, од друга страна, интегралните елементи се одликуваат со многу помало растурање на електричните парамет,и отколку елементите во едно дискретно коло. Така, на пример, додека кај дискретните транзистори за факторот на струјното засилување β тешко можат да се постигнат подобри толеранции од $\pm 20\%$, растурањето на истиот параметар кај тополошки идентични монолитни транзистори, изведени на еден ист чип, лежи во границите од $\pm 5\%$. Ова е директна последица од нивното заедничко (истовремено) процесирање, бидејќи заедничкото процесирање доведува и до "заеднички" грешки. Ако, на пример, поради грешки во изведувањето на базната и емитерската дифузија, реализираната база на еден транзистор е подебела од номиналната вредност за 20%, факторот β на тој транзистор ќе биде за одреден износ помал од пресметаниот. Меѓутоа, бидејќи базите на сите

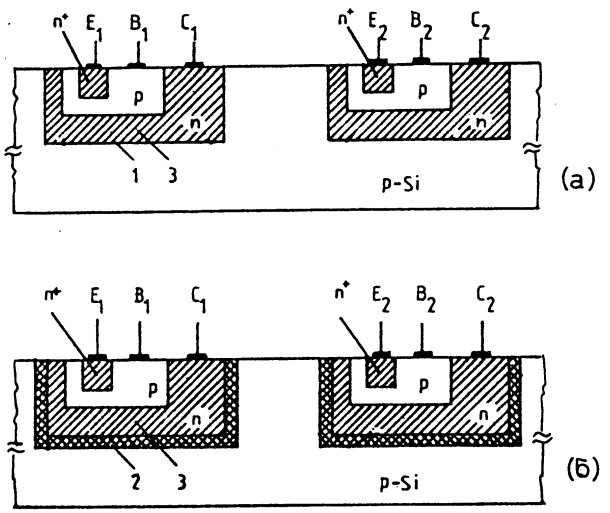
транзистори на чипот се реализирани со истата базна и истата емитерска дифузија,кај сите нив базата ќе биде подебела за истиот износ, па според тоа и факторот β помал од очекуваниот. Високата корелираност на параметрите на истотипните елементи кај интегралните кола овозможува да се реализираат прецизни електрични склопови врз база на елементи кои инаку имаат широки толеранции на апсолутните износи. Тоа се постигнува на тој начин што при синтезата на монолитните кола врз основа на зададена електрична функција се избираат такви споеви кај кои преносната функција зависи од односот, а не од апсолутните вредности на електричните параметри на составните елементи.

4.2. Основна разлика меѓу структурата на биполарните и структурата на MOS-интегралните кола [1,2]

За да се изолираат од подлогата, а со тоа и еден од друг, елементите на биполарните интегрални кола се вградуваат во т.н. изолациони острови (сл.4.1-а) кои се одвоени од подлогата со инверзно поларизирани изолациони pn-споеви. Инверзната поларизација на изолационите pn-споеви се обезбедува со поставување на p-подлогата на најнискиот потенцијал во колото, т.е. со нејзиното врзување на негативниот пол на изворот за напојување.

Треба да се забележи дека со поставувањето на елементите во изолациони острови практично се елиминираат паразитните (галвански и капацитивни) врски на релација елемент-елемент, но не и паразитните врски меѓу елементите и подлогата. Имено, меѓу даден елемент и подлогата ќе постои и галванска и капацитивна врска, условени со малата инверзна струја на заситување, односно со капацитивноста на преодното подрачје на инверзно поларизираниот изолационен pn-спој. Галванските врски обично можат да се игнорираат, меѓутоа за капацитивните врски мора да се води сметка бидејќи тие можат да имаат значајно влијание врз однесувањето на елементите при високи честоти. Така, на пример, капацитивноста меѓу колекторот и подлогата е една од основните причини што интегралниот npn-транзистор има полоши честотни својства отколку

соодветниот дискретен елемент. Специфичната капацитивност на изолациониот pn-спој обично се движи од 100 до 250 pF/mm^2, зависно од тоа дали се работи за долниот (хоризонталниот) дел на pn-спојот, или пак за неговите вертикални делови што излегуваат на површината.

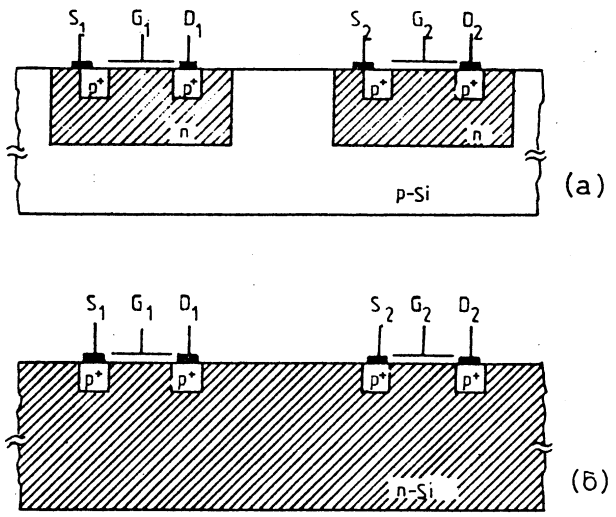


Сл.4.1. Изолација со инверзно поларизиран pn-спој (а) и со диелектрик (б)
1-изолационен pn-спој
2-диелектрик
3-изолационен остров

Капацитивните врски меѓу елементите и подлогата можат значително да се редуцираат ако наместо со инверзно поларизиран pn-спој изолационите острови се одвојат од подлогата со доволно дебел диелектрички слој, како што е покажано на сликата 4.1-б. На пример, ако како диелектрик се употреби слој од SiO_2, со дебелина од 1 μm, специфичната капацитивност на изолацијата ќе се сведе на 35 pF/mm^2. По правило, примената на диелектричка изолација наместо изолација со инверзно поларизиран pn-спој доведува до намалување на паразитната капацитивност меѓу елементот и подлогата за еден ред на големина. Сепак, и покрај оваа предност на диелектричката изолација, изолацијата со pn-спој е доминантен начин на одвојување на изолационите острови од подлогата. Примената на диелектричката изолација е ограничена само на специјални случаи во кои предностите што таа ги нуди се доволни за да се оправда нејзината значително посложена реализација и повисоката цена.

За разлика од елементите на биполарните интегрални кола, елементите на MOS-интегралните кола не се поставуваат во изолациони острови. Со други зборови, интегралните MOS-транзистори не се

реализираат така што секој од нив да има сопствен (локален) супстрат - каков што е случајот со шематиката на дискретните кола со MOS-транзистори - туку се вградуваат во заеднички супстрат, кој истовремено претставува и подлога на целото интегрално коло. Ова е можно бидејќи локалните супстрати (сл.4.2-а) можат да се спојат во еден заеднички супстрат (сл.4.2-б) без тоа да има поголемо влијание врз особините на соодветните елементи. Последното е разбирливо ако се има предвид дека потенцијалната разлика меѓу сорсот и супстратот има слабо влијание врз струјно-напонските карактеристики на MOS-транзисторот па, според тоа, не е неопходно сорсот и супстратот да бидат кратко споени, како што редовно се практикува во дискретната техника. Не е тешко да се констатира дека ако кај транзисторите на сликата 4.2-а ја прекинеме врската сорс-супстрат и ако двата супстрата ги поставиме на ист потенцијал, ќе преминеме всушност на ситуацијата дадена со сликата 4.2-б. Очигледно, структурата на сликата 4.2-б е многу поедноставна од структурата на сликата 4.2-а. Се разбира, потенцијалот на заедничкиот супстрат, т.е. на подлогата, треба да биде таков што pn-споевите на сите дифундирани подрачја да бидат инверзно поларизирани.



Сл.4.2. PMOS-транзистори со сопствени супстрати (а) и со заеднички супстрат (б)

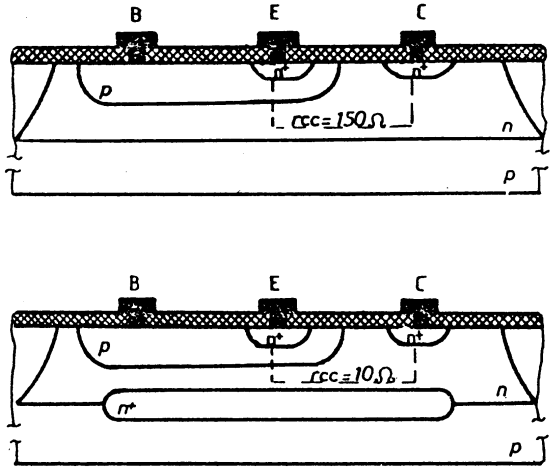
Немањето потреба од изолациони острови во голема мера ја упростува технологијата на изготвување на MOS-интегралните кола (отпаѓа потребата од нараснување на епитаксијален слој и од примена на изолациона дифузија) и овозможува поставување на елементите блиску еден до друг, т.е. постигнување голема густина на пакување. Едноставноста на технологијата и големата густина на пакувањето се две

важни предности на MOS-интегралните кола во споредба со биполарните интегрални кола.

4.3. Елементи на биполарните интегрални кола [1-16]

4.3.1. Потколекторски слој

На сликата 4.3-а е прикажан пресек на npn-транзистор добиен според постапките наведени во 2.10[1/]. Ваквите транзистори имаат ограничена примена бидејќи се карактеризираат со голема отпорност на колекторскиот слој (поголема од 100 Ω) r_{cc}. Како што е познато, отпорноста r_{cc} има негативно влијание врз карактеристиките на транзисторот: ја намалува брзината на работата и го зголемува напонот на заситувањето колектор-емитер V_{CEsat}. Навистина, вредноста на r_{cc} може да се намали со намалување на специфичната отпорност на епитаксијалниот слој, меѓутоа таквото решение е нерационално бидејќи доведува до намалување на пробивниот напон и зголемување на капацитивноста на колекторскиот pn-спој. Како стандардно решение на овој проблем, со кое отпорноста r_{cc} се сведува на десетина ома, се јавува-



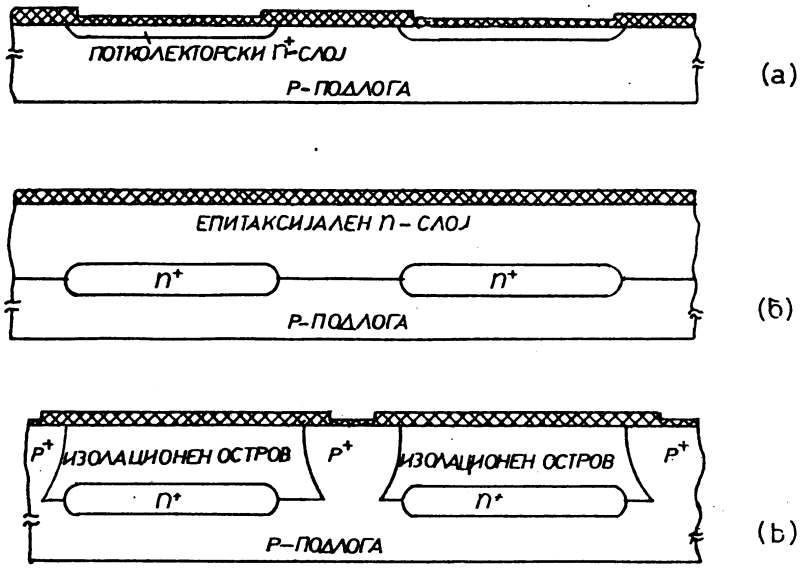
Сл.4.3. Структура на интегралниот npn-транзистор
а) без потколекторски слој
б) со потколекторски слој

1/ Заради едноставност, во овие цртежи и во цртежите во кои се претставени напречните пресеци на другите елементи на биполарните интегрални кола, површината на заштитниот SiO_2-слој е претставена како глатка, иако всушност таа е релјефна поради повеќекратното отворање отвори во слојот и нивното сукцесивно затворање со општа (обично термичка) оксидација. Освен тоа, во овие и во наредните цртежи, не е прикажан површинскиот заштитен оксиден слој (SiO_2), со кој обично се прекрива целата површина на плочката (по пат на јонско распрашување или хемиско напарување) по реализацијата на металзационата мрежа.

ва поставувањето на n^+-слој на дното од изолациониот остров (сл. 4.3-б). Овој слој е познат како потколекторски слој. Се покажува дека поставувањето потколекторски слој во изолационите острови има поволно влијание не само врз npn-транзисторите туку и врз другите елементи на биполарните интегрални кола. Затоа, изолационите острови на стандардните биполарни ингегрални кола се изведуваат редовно (со мал број исклучоци) со потколекторски слој.

Потколекторскиот слој се добива по пат на дифузија која се врши пред нараснувањето на епитаксијалниот слој. За време на епитаксијата донорските атоми од потколекторскиот слој, под дејство на високата температура, дифундираат во нараснуваниот епитаксијален слој, така што по завршувањето на епитаксијата потколекторскиот слој ќе биде делумно навлезен и во епитаксијалниот слој (обично неколку μm). За да се оневозможи претераното навлегување на донорските атоми од потколекторскиот слој во епитаксијалниот слој, како дифузант за потколекторскиот слој се употребува елемент со релативно мал дифузен коефициент - обично арсен или антимон.

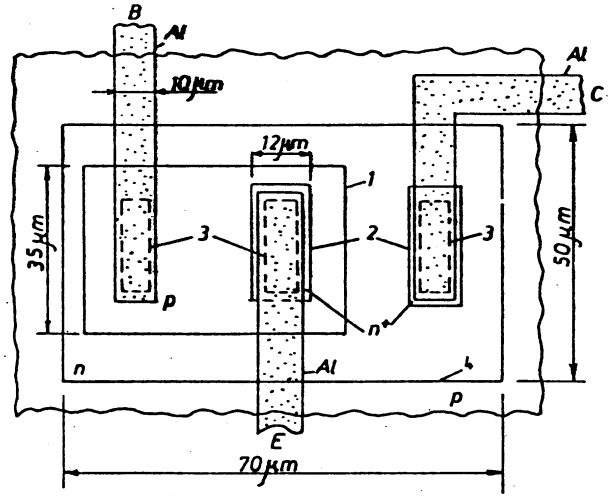
На сликата 4.4. е илустриран начинот на добивање изолациони острови со потколекторски слој.



Сл.4.4. Формирање изолациони острови со потколекторски слој

4.3.2. npn-транзистори

Монолитните npn-транзистори се основен конструктивен елемент на биполарните интегрални кола. Напречниот пресек на стандардниот монолитен npn-транзистор (се работи за транзистор со широка примена во аналогните и дигиталните кола со мал и среден степен на интеграција) е прикажан на сликата 4.3-б, а топологијата заедно со типичните планарни димензии на слоевите, на сликата 4.5. Во табелата 4.1. се дадени типичните вредности на некои други карактеристични параметри на слоевите на стандардниот npn-транзистор; со N_n е означена нето-примесната концентрација, со d - дебелината, со ρ - специфичната отпорност и со R_s - слојната отпорност. Податоците дадени за нето-примесната концентрација на емитерскиот, базниот и потколекторскиот слој се однесуваат на максималната вредност на концентрацијата.



Сл.4.5.Топологија на npn-транзисторот
1-отвор на базната дифузија
2-отвори на емитерската дифузија
3-контактни отвори
4-граница на прстенот на изолационата дифузија

Во табелата 4.2 се презентирани типичните вредности на поважните електрични параметри на стандардниот монолитен npn-транзистор. Како што се гледа, пробивниот напон на емитерското преодно подрачје е 5 до 8 пати помал отколку на колекторското. Ова е резултат на фактот што емитерското преодно подрачје се наоѓа меѓу слоеви со помала специфична отпорност отколку колекторското. Пробивниот напон меѓу колекторот и емитерот (при отворена база), кој не е даден во табелата, е значително помал од пробивниот напон на колекторското преодно подрачје, согласно со познатата релација:

Табела 4.1. Типични параметри на слоевите на интегралниот npn-транзистор

Назив на слојот	N_n, cm^{-3}	d, μm	ρ, Ωcm	R_s, Ω/□
Подлога (од p-тип)	$1,5x10^{15}$	200 до 300	10	-
Потколекторски n^+-слој	10^{20} до 10^{21}	5 до 20	-	8 до 20
Епитаксијален n-слој	10^{16}	8 до 20	1	500 до 1250
Базен p-слој	$5x10^{18}$	2 до 3	-	170 до 250
Емитерски n^+-слој	10^{21}	1,5 до 2,5	-	2 до 10

Табела 4.2. Типични електрични параметри на интегралните npn-транзистори

Параметар	Номинална вредност	Толеранции, %
Фактор на струјното засилување за спој со заеднички емитер β	50 до 200	±30
Преносна честота f_T, MHz	200 до 500	±20
Капацитивност на колекторското преодно подрачје C_c, pF	0,3 до 2,0	±10
Пробивен напон $V_{(BR)CBO}$, V	40 до 50	±30
Пробивен напон $V_{(BR)EBO}$, V	6 до 8	± 5

$$V_{(BR)CEO} = \frac{V_{(BR)CBO}}{\beta^{1/n}} \qquad (4.3.1)$$

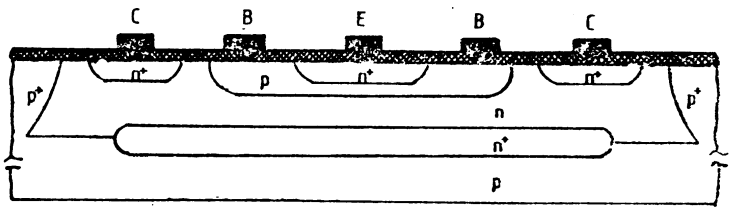
каде што β е факторот на струјното засилување на транзисторот, а n е емпириска константа со вредност од 3 до 5.

Дебелината на базата најчесто се движи од 0,5 до 0,7 μm и токму при таква база се остварува фактор на струјното засилување β=50÷200. Кај некои типови операциони засилувачи се применуваат т.н. супербета-транзистори. Базата на овие транзистори е извонредно тенка (0,2 до 0,3 μm), а базната област - високоомска. На тој начин се добиваат вредности за β од 2000 до 5000. За супербета-транзисторот е карактеристичен низок пробивен напон $V_{(BR)CEO}$=0,5-1V, кој се должи на ефектот на слепување на колекторот со емитерот поради многу тенката и високоомска база.

Од паразитните параметри на интегралниот npn-транзистор најзначајни се капацитивноста колектор-подлога C_{cs} и отпорноста на колекторскиот слој r_{cc}. Капацитивноста C_{cs} всушност одговара на капацитивноста на инверзно поларизираниот изолационен pn-спој Во спојот со заедничка база таа доаѓа паралелно со капацитивноста на колекторското преодно подрачје C_c, а во спојот со заеднички емитер - паралелно со оптоварувањето. Отпорноста r_{cc}, за која веќе зборувавме, всушност ја претставува отпорноста меѓу активниот дел на колекторот (делот на колекторската област што се наоѓа под емитерот) и колекторскиот контакт. И двата параметра (C_{cs} е карактеристичен само за интегралните транзистори, а r_{cc} се среќава и кај дискретните транзистори) негативно влијаат врз брзината на работа на транзисторот, т.е. го намалуваат неговиот честотен дострел. Капацитивноста C_{cs}, во извесна мера, е корелирана со капацитивноста C_c. Имено, односот на овие капацитивности во прв ред зависи од односот на плоштините на соодветните pn-споеви и односот на нето-примесните концентрации на подлогата и колекторската област. Обично е C_{cs}=(2÷3)C_c па, согласно со табелата 4.2, C_{cs} се движи од 0,6 до 4 pF. Како што веќе рековме, типичната вредност на отпорноста r_{cc} кај транзисторите со потколекторски слој е 10 Ω.

Освен во конфигурацијата претставена на сликите 4.3-б и 4.5, која се карактеризира со по еден колекторски и еден базен контактен отвор, биполарниот npn-транзистор се изведува и во други конфигурации, како, на пример, во симетричната конфигурација претставена на сликата 4.6. Бидејќи овде колекторската и базната струја имаат по два пристапа до активниот дел на колекторот, односно активниот дел на базата (делот на базната област под емитерот), отпорностите на колекторскиот и базниот слој r_{cc} и r_{bb}

грубо земено, ќе бидат два пати помали отколку во претходниот случај.

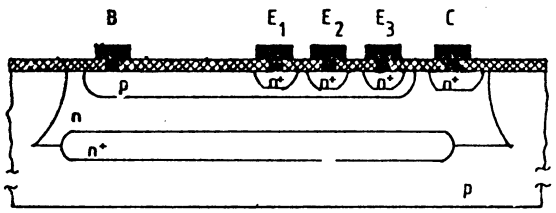


Сл.4.6. npn-транзистор со симетрична конфигурација

Во современата електроника, особено во дигиталната техника, се присутни две основни тенденции: намалување на димензиите и зголемување на брзината на работа на интегралните елементи. npn-транзисторите реализирани врз база на стандардната планарна технологија, зафаќаат плоштина (земајќи ја предвид и изолационата дифузија) од околу 10000 μm^2, а преносната честота им достига до 500 MHz. Постојат, меѓутоа, и npn-транзистори со значително помали димензии и поголеми преносни честоти, кои се добиваат по пат на одредени модификации во стандардната планарна технологија. Такви се, на пример, т.н. изопланарни транзистори. Тие зафаќаат плоштина од само 1500 μm^2, а преносната честота им достига до 3 GHz.

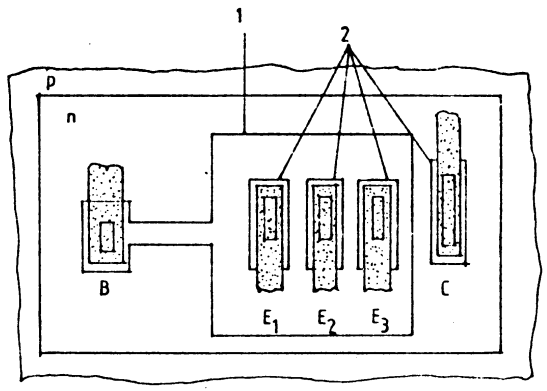
Многуемитерски npn-транзистори Многуемитерскиот npn-транзистор е еден од најмногу употребуваните монолитни интегрални елементи (се јавува како најкарактеристичен елемент во TTL-техниката) што немаат свои аналози во дискретната техника. Во конструкционен поглед, многуемитерскиот транзистор е практично идентичен со обичниот npn-транзистор, со таа разлика што наместо едно има две или повеќе емитерски подрачја, како што е покажано на сликата 4.7. Според тоа, реализацијата на многуемитерскиот транзистор не бара никакви дополнителни постапки во однос на оние што се потребни за реализација на стандардниот npn-транзистор. Иначку, во шематска поглед, многуемитерскиот npn-транзистор може да се посматра како

множество од неколку обични npn-транзистори со меѓусебно споени бази и меѓусебно споени колектори.



Сл.4.7. Многуемитерски npn-транзистор

Од многуемитерските npn-транзистори обично се бара факторот на инверзното струјно засилување h_{FEI} да им биде помал од 0,1[1/]. Вака мала вредност за h_{FEI} се постигнува со посебната топологија на транзисторот (сл.4.8). Имено, за таа цел, намерно се намалува ширината, односно се зголемува должината на неактивниот дел на базниот слој за да се зголеми неговата отпорност до вредност од повеќе стотици ома. Со тоа се обезбедува - благодарејќи на падот на напонот што го создава базната струја врз базниот слој кога транзисторот се наоѓа во инверзното активно подрачје - директната поларизација на колекторскиот pn-спој да биде нерамномерна, т.е. поларизацијата во подрачјето на активната база да биде за 0,10 до 0,15V помала отколку во близината на базниот контакт. Како резултат на ваквата распределба на поларизацијата, инјекцијата на електрони од колекторот во подрачјето на активната база ќе биде незначителна, па најго-



Сл.4.8. Топологија на многуемитерскиот npn-транзистор

1-отвор за базната дифузија
2-отвор за емитерската дифузија

1/ Факторот h_{FEI} кај многуемитерскиот транзистор е дефиниран како однос на сумата од сите емитерски струи и базната струја, кога колекторскиот pn-спој е директно поларизиран, а сите емитерски pn-споеви - инверзно.

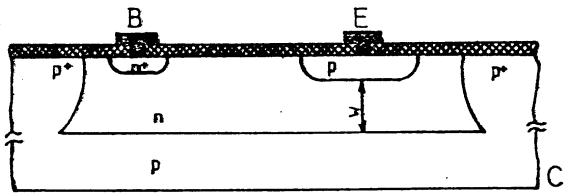
лемиот дел од колекторската струја ќе се реализира преку електроните инјектирани во пасивниот дел од базата,кои тука и се рекомбинираат. Консеквентно, вредноста на факторот h_{FEI} ќе биде многу помала отколку кај стандардниот npn-транзистор.

Растојанијата меѓу соседните емитерски подрачја кај многуемитерскиот npn-транзистор се редовно неколку пати поголеми од дифузната должина на електроните во базниот слој и обично се движат од 10 до 15 μm. Со тоа се елиминира можноста соседните n^+-подрачја заедно со p-слојот меѓу нив да дејствуваат како паразитни n^+pn^+-транзистори.

4.3.3. pnp-транзистори

Со стандардната планарна технологија се реализираат два типа pnp-транзистори: супстратен и хоризонтален. Овие транзистори заостануваат зад стандардниот npn-транзистор како во поглед на факторот на струјното засилување така и во поглед на преносната честота, а имаат и други недостатоци. Навистина, можно е да се реализира исто толку квалитетен pnp-транзистор како и стандардниот npn-транзистор, но само преку воведување дополнителни технолошки постапки или преку нестандардни решенија кои се редовно значително посложени од стандардната планарна технологија.

На сликата 4.9 е прикажан напречниот пресек на супстратниот pnp-транзистор. Кај овој транзистор емитерот се формира со базната дифузија, како база служи епитаксијалниот слој, а како колектор - подлогата. Примената на супстратниот транзистор е во голема мера ограничена со фактот што како колектор служи подлогата - која секогаш се врзува на најнегативниот потенцијал во колото. Имено, спојот со заеднички колектор е единствениот спој во кој можат да се применуваат супстратните транзистори. Базата на супстратните транзистори е униформно легирана, а нејзината дебелина w (типично 8 μm) е одредена со дебелината на епитаксијалниот слој и длабочината на базната дифузија. Поради релативно големата дебелина на базата, струјното засилување β кај овие транзистори е одредено главно со транспортниот фактор. Сепак, благодарение на големото време на живот τ на ексцесните споредни носители во епитаксијалниот слој (што имплицира и голема дифузна должина), за β се постигнуваат вредности до 50. Меѓутоа, преносната честота f_T, која е обратно пропорционална со времето на живот τ, т.е. $f_T=\beta/2\pi\tau$, не ја надминува вредноста од 10 MHz.



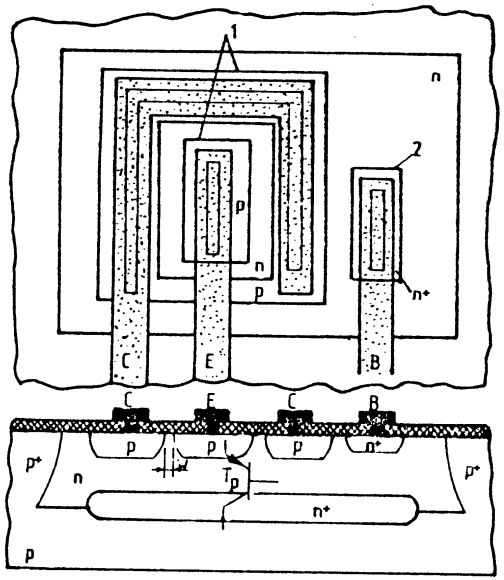
Сл.4.9. Супстратен pnp-транзистор

За разлика од повеќето биполарни интегрални елементи, супстратниот pnp-транзистор се изведува без потколекторски слој. Тоа е затоа што потколекторскиот слој создава внатрешно поле кое во долниот дел на епитаксијалниот слој дејствува од подлогата кон површината на плочката. Постоењето на вакво поле го отежнува движењето на празнините од емитерот кон колекторот, т.е. доведува до намалување на факторот β.

Хоризонталниот pnp-транзистор (сл.4.10) претставува основна (најчесто употребувана) структурна варијанта на интегралниот pnp-транзистор. За разлика од супстратниот pnp-транзистор, тој е изолиран од подлогата, па може да се употребува во кој и да било спој. Наоѓа примена во аналогните кола, и тоа главно како динамичко оптоварување, струен извор и поместувач на нивоа.

Емитерскиот и колекторскиот слој на хоризонталниот транзистор се реализираат истовремено, со базната дифузија, а како база служи епитаксијалниот слој. Колекторскиот слој го опфаќа емитерот од сите страни. Тоа му овозможува да ги собира инјектираните празнини од сите бочни делови на емитерскиот слој. Називот "хоризонтален транзистор" го одразува фактот што најголемиот дел од празнинската струја, инјектирана од емитерот, се распространува кон колекторот паралелно со површината на чипот, т.е. во правец кој е условно земен како хоризонтален. Дебелината на базата w е одредена со растојанието меѓу отворите за дифузија на емитерот и колекторот и зависи од можностите на фотолитографскиот процес. Најчесто се движи во границите од 2 до 5 μm. Со оглед на релативно големата дебелина на базата, максималната вредност на факторот на струјното засилување β е ограни-

чена на 50, а на преносната честота f_T на 20 до 40 MHz. Пробивните напони на емитерското и колекторското преодно подрачје се приближно еднакви и рамни на пробивниот напон на колекторскиот pn-спој кај стандардниот npn-транзистор (40 до 50 V). Поради слабата легираност на епитаксијалниот слој, Ерлиевиот ефект кај хоризонталниот pnp-транзистор е силно изразен. Затоа наклонот на излезните карактеристики на овој транзистор е поголем отколку кај стандардниот npn-транзистор. Од истите причини, пробивниот напон $V_{(BR)CEO}$ кај хоризонталните транзистори со дебелина на базата од 2 до 3 μm е доста низок (5 до 8 V). Имено, кај нив доминантен механизам на пробивот меѓу колекторот и емитерот е ефектот на слепување на колекторот со емитерот.



Сл.4.10.Хоризонтален pnp-транзистор
1-отвор на базната дифузија
2-отвор на емитерската дифузија

Покрај дебелата база, има уште една причина поради која факторот на струјното засилување β кај хоризонталниот pnp-транзистор е ограничен на релативно мали вредности. Имено, се работи за присуството на паразитниот транзистор T_p (види ја сликата 4.10). Емитерот и базата на овој транзистор се совпаѓаат со емитерското и базното подрачје на хоризонталниот pnp-транзистор, а како колекторско подрачје се јавува подлогата. Кога хоризонталниот pnp-транзистор се наоѓа во нормалното активно подрачје, во нормалното активно подрачје се наоѓа и паразитниот транзистор, па базната струја на паразитниот транзистор ја зголемува, ефективно, базната струја на хоризонталниот транзистор, со што го намалува неговото струјно засилување. Во прва апроксимација,

односот на корисната базна струја на хоризонталниот транзистор и базната струја на паразитниот транзистор е пропорционален со односот на плоштината на бочните страни и плоштината на дното на емитерското подрачје. Според тоа, за да се намали негативниот ефект на паразитниот транзистор потребно е емитерскиот слој да се изведе така што односот на горе споменатите плоштини да биде што е можно поголем. Затоа, широчината на отворот за дифузија на емитерскиот слој е обично еднаква на најмалата широчина што ја дозволува фотолитографскиот процес (3 до 5 μm).

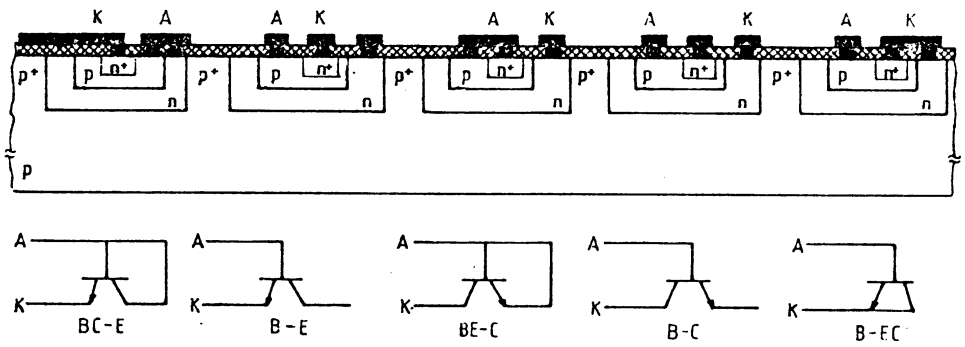
Полето што го создава потколекторскиот n^+-слој служи како рефлектор на празнините упатени од емитерското подрачје кон подлогата. Ова поле фактички ја зголемува корисната емитерска површина на сметка на некорисната, што значи и корисната базна струја на хоризонталниот pnp-транзистор на сметка на базната струја на паразитниот транзистор. Според тоа, нето-ефект на дејството на полето на потколекторскиот слој е зголемување на факторот на струјното засилување β. Токму благодарение на потколекторскиот слој факторот на струјното засилување β кај современите хоризонтални pnp-транзистори достигнува 50, што е најмалку за еден ред на големина повеќе од она што може да се постигне без потколекторски слој.

4.3.4. Монолитни диоди

Во интегралната техника, улогата на диода може да ја врши кој и да било pn-спој, меѓутоа за таа цел најчесто се користат емитерскиот и колекторскиот pn-спој на стандардниот npn-транзистор. Можни се 5 варијанти на врзување на npn-транзисторот во диоден спој (сл.4.11) и врз таа основа постојат 5 различни типови монолитни диоди. Секоја од овие варијанти има одредени предности, но и недостатоци, што се гледа од податоците дадени во табелата 4.3.

Пробивниот напон $V_{(BR)}$ зависи од тоа кој pn-спој на npn-транзисторот се користи како диода. Тој е помал кај варијантите во кои се користи емитерскиот pn-спој (самостојно или паралелно со колекторскиот pn-спој), а поголем кај варијантите во кои се користи само колекторскиот pn-спој.

Инверзната струја I_R зависи, главно, од волуменот на преодното подрачје и според тоа таа е најмала кај варијантите BC-E и B-E, во кои се користи само емитерскиот pn-спој, а најголема во варијантата B-EC во која се користат паралелно и емитерскиот и колекторскиот pn-спој.



Сл.4.11. Монолитни диоди

Табела 4.3. Типични параметри на интегралните диоди

Параметар	Тип на диодата				
	BC-E	B-E	BE-C	B-C	B-EC
$V_{(BR)}$, V	6-8	6-8	40-50	40-50	6-8
I_R, nA	0,5-1	0,5-1	15-30	15-30	20-40
C_D, pF	0,5	0,5	0,7	0,7	1,2
t_{rr}, ns	10	50	50	75	100

Капацитивноста C_D, која се мери меѓу анодата и катодата при одредена инверзна поларизација на диодата, зависи главно од плоштината на користените pn-споеви и, според тоа, има најголема вредност при паралелното користење на емитерскиот и колекторскиот pn-спој, т.е. кај варијантата B-EC.

Времето t_{rr} претставува време на инверзното смирување на диодата. Најмало е кај варијантата BC-E, бидејќи кај неа полнежот на споредни носители се натрупува само во базата, за разлика од другите варијанти кај кои се јавува натрупување и во колекторското подрачје.

Освен кај варијантата BC-E, кај сите други варијанти катодната струја е нешто помала од анодната. Тоа се должи на паразитниот pnp-транзистор база-колектор-подлога, кој при секоја директна поларизација на диодата влегува во нормалното активно подрачје одведувајќи дел од анодната струја во подлогата. Монолитните диоди редовно се изведуваат со потколекторски слој, бидејќи неговото присуство го намалува штетното дејство на паразитниот pnp-транзистор.

Треба да се забележи дека меѓу диодата и подлогата постои паразитна капацитивност C_o која ја шантира анодата или катодата на "маса" - зависно од тоа која од нив е споена со слојот што е најблиску до подлогата. Во сите случаи, оваа капацитивност е идентична со капацитивноста C_{cs}. Исклучок е варијантата B-E кај која е $1/C_o=1/C_c+1/C_{cs}$. Паразитната капацитивност C_o, како и паразитниот pnp-транзистор, има неповолно влијание врз работата на електронските склопови.

Споредувајќи ги одделните диодни споеви, се доаѓа до заклучок дека, општо земено, најдобри својства имаат варијантите BC-E и B-E. Единствената слаба страна на овие споеви е малиот пробивен напон, што не претставува голем недостаток кога се работи за примена кај нисковолтните интегрални кола. Во практиката најмногу се користи варијантата BC-E. Доколку е потребна диода со поголем пробивен напон, треба да се користи варијантата BE-C или варијантата B-C.

4.3.5. Монолитни отпорници

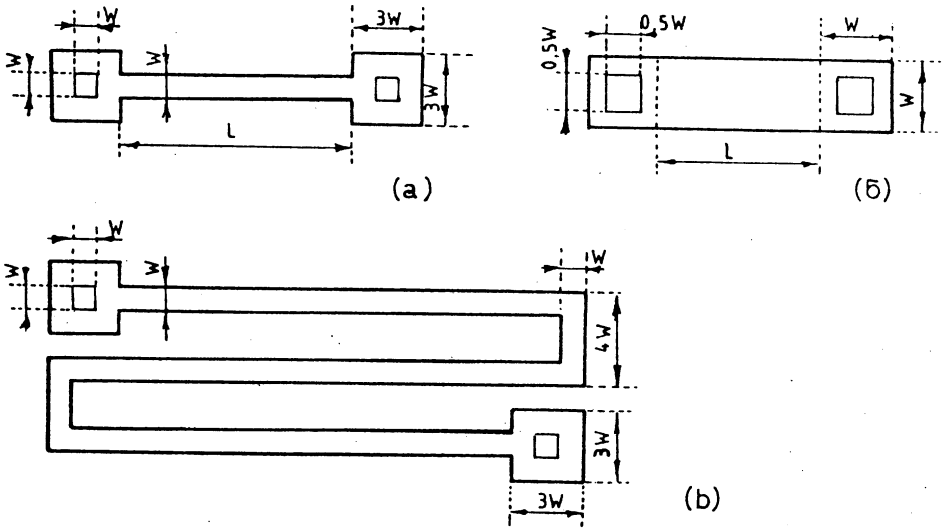
Во современите монолитни интегрални кола се применуваат три основни вида отпорници: дифузни, епитаксијални и имплантирани. Дифузните и епитаксијалните отпорници се изготвуваат со постапките на стандардната епитаксијално-планарна технологија. Именно, дифузните отпорници се формираат врз база на слоевите што се добиваат со базната и емитерската дифузија, а епитаксијалните отпорници - врз база на епитаксијалниот слој. Имплантираните отпор-

ници се реализираат со помош на техниката на јонска имплантација. Според структурата, можат да се разликуваат три типа дифузни отпорници: базен отпорник, емитерски отпорник и пинч-отпорник.

На сликата 4.12 се прикажани најчесто применуваните тополошки конфигурации на монолитните отпорници. Конфигурациите на сликите 4.12-а и б се познати како линиски , а конфигурацијата на сликата 4.12-в - како серпентинска . Бројот на серпентините обично не е поголем од 3. Очигледно, реализираната отпорност ќе биде дадена со релацијата:

$$R = R_s \frac{L}{W} + 2R_{cm} \qquad (4.3.2)$$

каде што R_s, L и W се слојната отпорност, должината и ширината на основниот дел на отпорникот, а R_{cm} е отпорноста на приконтактните подрачја. Кај серпентинскиот отпорник, под должина на основниот дел се подразбира должината на средната линија на основниот дел. Отпорноста на приконтактните подрачја R_{cm} може да се



Сл.4.12. Тополошки конфигурации на монолитните отпорници

изрази преку нивната слојна отпорност R_{s1}, која не мора да биде идентична со R_s. Така, на пример, за конфигурацијата на сликата 4.12-а е $R_{cm}=0,65R_{s1}$, а за конфигурацијата на сликата 4.12-б важи $R_{cm}=0,33R_{s1}$.

При попрецизното одредување на отпорноста на серпентинскиот отпорник треба да се има предвид фактот дека отпорноста на квадратите во аглите не е еднаква на R_s, како што претпоставува релацијата (4.3.2), туку дека е еднаква на 0,56 R_s - што може да се покаже со помош на методот на конформно пресликување. Според тоа, ако со m се означи бројот на прекршувањата (во случајот на сликата 4.12-в е m=4), точниот израз за отпорноста на серпентинскиот отпорник ќе гласи:

$$R = R_s \left(\frac{L}{W} - 0,44 \times m\right) + 2R_{cm} \qquad (4.3.3)$$

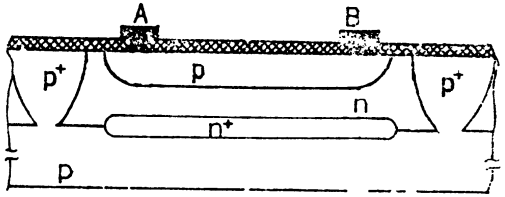
Конфигурацијата на сликата 4.12-б се применува за мали односи R/R_s, додека конфигурациите на сликите 4.12-а и в за средно големи и големи односи R/R_s.

Основни параметри на монолитните отпорници се:

- номиналната вредност на отпорноста R(Ω),
- слојната отпорност R_s(Ω/□),
- температурниот коефициент на отпорноста TCR=dR/RdT (K^{-1}),
- факторот на дозволеното отстапување од номиналната вредност $\gamma_R=\gamma\{\Delta R/R\}(\%)$, 1/
- факторот на дозволеното отстапување од односот на номиналните вредности $\gamma_{R_1/R_2}=\gamma\{\Delta(R_1/R_2)/(R_1/R_2)\}(\%)$,
- максималната дозволена моќност P_{max}(mW).

1/ Декларирајќи дека дадена класа отпорници има фактор на дозволеното отстапување од номиналната вредност γ_R, производителот всушност гарантира дека случајната варијабла $\Delta R/R$ со веројатност не помала од некој износ (обично не помала од 0,9973) ќе прими вредност од интервалот $(-\gamma_R,\gamma_R)$. Значи, со факторот γ_R се претставени толеранциите $(\pm\gamma_R)$ на класата отпорници.

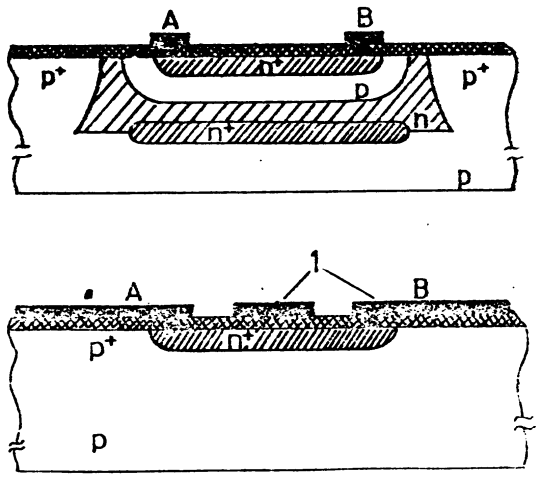
Од дифузните отпорници најголема примена имаат базните отпорници, кои се реализираат со базната дифузија. На сликата 4.13 е прикажан напречниот пресек на еден базен отпорник. Изолацијата на отпорникот од подлогата се остварува со спојување на n-подрачјето на изолациониот остров на највисокиот потенцијал во колото. Очигледно, ваквата изолација овозможува повеќе отпорници да бидат поставени во ист изолационен остров. Со оглед на тоа што типичната вредност на слојната отпорност на базната дифузија изнесува 200 Ω/□ , базните отпорници можат да го покријат подрачјето од 100 Ω до 60 kΩ. Помали отпорници од 100 Ω тешко можат да се реализираат со доволна прецизност, а реализацијата на поголеми отпорности од 60 kΩ бара премногу голема плоштина од чипот.



Сл.4.13. Напречен пресек на базен отпорник

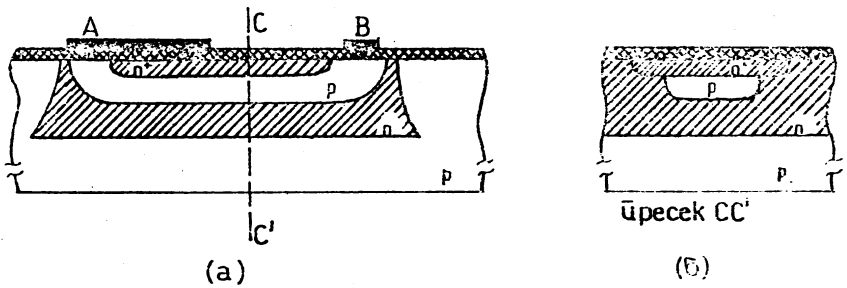
Емитерските отпорници се користат за реализација на мали отпорности - од неколку ома до неколку стотици ома. Тие се базираат врз високо легираниот емитерски n^+-слој, чија слојна отпорност се движи од 2 до 10 Ω/□. Ваквите отпорници се реализираат не само во дадени базни p-подрачја во изолационите острови (сл.4.14-а) туку и надвор од изолационите острови - во p^+-слојот на изолационата дифузија (сл.4.14-б). Изолацијата на n^+-подрачјето на отпорникот на сликата 4.14-а обично се изведува така што p-подрачјето на базната дифузија кратко се спојува со подлогата, а n-подрачјето на изолациониот остров се поставува на највисокиот потенцијал во колото. Ваквата изолација овозможува повеќе емитерски и базни отпорници да бидат сместени во еден ист изолационен остров.

Со користење на n^+-слојот на емитерската дифузија може да се реши уште еден проблем кој се јавува при конструирањето на интегралните кола - имено, проблемот на меѓусебно вкрстување на две проводни (алуминиумски) патеки. Тоа се остварува на тој начин што на местото на вкрстувањето едната од патеките поминува под другата преку нискоомски (3 до 5 Ω) емитерски отпорник (сл.4.14-б). Ваквото вкрстување е познато како тунелско вкрстување.



Сл.4.14. Емитерски отпорник во изолационен остров (а) и надвор од изолационите острови (б)
1- патеки што се вкрстуваат

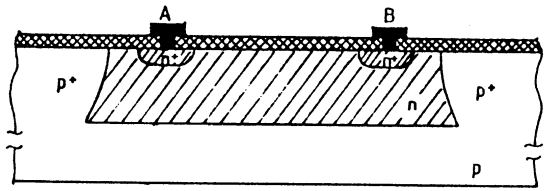
Пинч-отпорниците се дифузни отпорници што се користат за реализација на поголеми отпорности од оние што ги овозможува базната дифузија. Нивната структура е прикажана на сликата 4.15. Се реализираат на тој начин што најнапред се остварува базен отпорник со таква топологија каква што треба да има пинч-отпорникот, а потоа врз остварениот базен отпорник се врши емитерска дифузија низ доволно широк отвор за p-подрачјето на пинч-отпорникот да биде целосно опфатено со полупроводник од n-тип. Јасно, слојната отпорност на пинч-отпорникот ќе одговара на слојната отпорност на базата на стандардниот npn-транзистор ($2x10^3$ до 10^4 Ω/□). Пинч-отпорникот овозможува реализација



Сл.4.15. Пинч -отпорник

на отпорности до 1 MΩ. Изолацијата на p-подрачјето на отпорникот од n^+-подрачјето на емитерската дифузија и n-подрачјето на изолациониот остров обично се остварува на тој начин што оној крај на отпорникот што ќе се наоѓа на повисок потенцијал кратко се спојува со n^+-подрачјето на емитерската дифузија (сл. 4.15-а), а преку него и со n-подрачјето на изолациониот остров (сл.4.15-б).

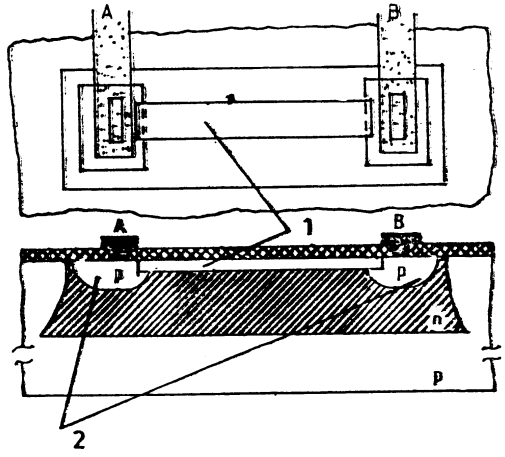
Структурата на епитаксијалниот отпорник, кој е познат уште и како колекторски отпорник, е прикажана на сликата 4.16. Со оглед на тоа што типичната вредност на слојната отпорност на епитаксијалниот слој е 1000 Ω/□, значи околу 5 пати поголема од слојната отпорност на базната дифузија, овој отпорник може да се користи за реализација на отпорности до неколку стотини килоома. Се разбира, епитаксијалниот отпорник не смее да има потколекторски слој.



Сл.4.16. Епитаксијален (колекторски) отпорник

Во последно време сè повеќе се користат т.н. имплантирани отпорници (сл.4.17), кои за разлика од дифузните, се остваруваат по пат на јонска имплантација на примеси (најчесто бор). Имплантираните отпорници имаат слична структура со базните, со таа разлика што длабочината на имплантираниот слој (0,1 до 0,3 μm) е значително помала од длабочината на базната дифузија. Последново овозможува остварување на големи слојни отпорности (до 20 kΩ/□), па со имплантираните отпорници можат да се реализираат отпорности од ред на големина 1 MΩ. Малата дебелина на имплантираниот слој го отежнува формирањето на добри контакти. Затоа, на краевите од отпорничкиот слој, истовремено со базната дифузија, се реализираат p-подрачја со поголема дебелина, на кои потоа се остваруваат омските контакти на вообичаен начин .

Во табелата 4.4. се дадени типичните подрачја на вредностите на некои од основните параметри на монолитните отпорници.



Сл.4.17. Имплантиран отпорник
1-имплантиран слој
2-дифундирани подрачја

Темепратурниот коефициент кај монолитните отпорници е позитивен.Тоа се должи на намалувањето на подвижноста на основните носители со порастот на температурата,што е последица на зголемувањето на топлинските осцилации на кристалната решетка. Кај нисколегираните полупроводници доминантна улога во одредувањето на подвижноста на основните носители играат судирите со осцилирачките атоми на кристалната решетка, додека влијанието на судирите со јонизираните примесни атоми е помалку значајно. Кај високолегираните полупроводници, ситуацијата е обратна: доминантно е влијанието на судирите со примесните атоми, бидејќи честотата на овие судири ја надминува честотата на судирите со атомите од кристалната решетка. Оттука следува дека со зголемување на степенот на легираноста не само што се намалува подвижноста на основните носители туку се намалува и нејзиниот температурен коефициент. Последново е во целосна согласност со податоците за температурните коефициенти на монолитните отпорници дадени во тебелата 4.4. Фактот што имплантираниот отпорник има мал температурен коефициент, и покрај релативно големите слојни отпорности, не треба да збунува бидејќи високите слојни отпорности кај него се постигнуваат на сметка на малата дебелина на слојот, при што нивото на легираност е секогаш високо ($N_A \geq 10^{17}$ cm^{-3}).

Отстапувањето ΔR од номиналната вредност R кај монолитните отпорници е резултат на производствените отстапувања ΔR_s, ΔL и ΔW од проектираните вредности R_s, L и W, респективно, и е дадено со изразот:

Табела 4.4. Типични параметри на монолитните отпорници

Тип на отпорникот	R_s, Ω/□	TCR, %K^{-1}	γ_R, %	γ_{R_1/R_2}, %
базен	170 до 200	0,15 до 0,30	10 до 20	1 до 3
емитерски	2 до 10	0,01 до 0,05	10 до 20	1 до 3
епитаксијален	500 до 1250	0,30 до 0,50	15 до 30	2 до 3
пинч-отпорник	2000 до 10000	0,30 до 1,00	30 до 60	3 до 8
имплантиран	500 до 20000	0,01 до 0,05	3 до 6	1 до 2

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta R_s}{R_s} + \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta W}{W} \qquad (4.3.4)$$

кој се добива со логаритмирање и диференцирање на двете страни на приближната релација $R=R_s L/W$. Отстапувањето ΔR_s се должи на грешки во контролата на дифузијата, односно во контролата на епитаксијалниот раст или јонската имплантација, зависно од типот на отпорникот. Отстапувањата ΔL и ΔW се јавуваат како резултат на грешки во изготвувањето на фотошаблонот, односно фоторезистната и оксидната маска. Со оглед на независноста на овие отстапувања од големината на должината L и широчината W, произлегува дека влијанието на фотолитографските грешки врз отстапувањето од номиналната отпорност се зголемува со намалувањето на димензиите на отпорникот. Според тоа, L и W не смеат да бидат помали од некоја минимална вредност, која зависи од прифатените толеранции. Широчината W кај монолитните отпорници најчесто се движи од 10 до 25 μm.

Од табелата 4.4. се гледа дека најголем фактор на дозволеното отстапување од номиналната вредност имаат пинч-отпорниците. Тоа е разбирливо ако се има предвид фактот дека слојната отпорност кај овие отпорници е функција од две последователни дифузии, т.е. дека е осетлива како на грешките во базната дифузија така и на грешките во емитерската дифузија. Големите вредности на факторот γ_R кај епитаксијалните отпорници се должат главно на релативно лошата контрола на специфичната отпорност и

дебелината на епитаксијалниот слој. Најмал фактор γ_R имаат имплантираните отпорници, бидејќи техниката на јонска имплантација овозможува добра контрола на количеството внесени примеси по единица плоштина.

Во табелата 4.5. е илустрирано влијанието на технолошките постапки врз точноста на реализацијата на отпорности и односи на отпорности кај базните отпорници. Од податоците се гледа дека најголемо влијание имаат грешките на дифузијата, што покажува дека тешко се остварува контролата врз количеството внесени примеси и врз длабочината на нивното навлегување. Исто така се гледа дека односите на отпорностите на два отпорника се реализираат со доста висока точност. Тоа можеше и да се очекува бидејќи слоевите на отпорниците се формираат истовремено, со истата дифузија, т.е. при исти услови.

Табела 4.5. Влијание на технолошките постапки врз точноста на базните отпорници

Постапки	γ_R, %	γ_{R_1/R_2}, %
Изготвување на фотошаблонот и фоторезистната маска	1	1
Формирање (нагризување) на оксидната маска	2	1
Базна дифузија	7	1
Сè заедно	10	3

Моќноста на монолитните отпорници P е ограничена со дозволениот пад на напон U_{max} ($P < U^2_{max}/R$) и дозволената густина на дисипацијата Q_{max} ($P < Q_{max} WL$). Падот на напонот е ограничен со пробивниот напон на pn-спојот што ја реализира изолацијата на отпорникот. Кај емитерскиот pn-спој пробивниот напон се движи од 6 до 8 V, а кај колекторскиот - од 40 до 50 V. Со оглед на релативно високата топлинска проводност на силициумот, мак-

сималната дозволена густина на диспацијата кај монолитните отпорници изнесува околу 7000 mW/mm^2, што е доста голема вредност.

4.3.6. Монолитни кондензатори

Во монолитните интегрални кола обично се користат два вида кондензатори: кондензатори базирани на инверзно поларизирани pn-споеви (pn-кондензатори) и кондензатори со структура метал-диелектрик-полупроводник (MIS-кондензатори). pn-кондензаторите всушност ја користат капацитивноста на колекторското или емитерското преодно подрачје, односно капацитивноста на преодното подрачје меѓу епитаксијалниот слој и подлогата. Кај MIS-кондензаторите, како диелектрик се употребува SiO_2 или Si_3N_4. Сите наведени кондензатори, освен MIS-кондензаторите со Si_3N_4 како диелектрик, се реализираат со постапките на стандардната епитаксијално-планарна технологија. Од погоре споменатите кондензатори, најзначајни се pn-кондензаторите базирани на колекторскиот или емитерскиот pn-спој , кои се познати како дифузни кондензатори, и MIS-кондензаторите базирани на SiO_2, кои се познати како MOS-кондензатори. Примената на pn-кондензаторите од типот епитаксијален слој—подлога и на MIS-кондензаторите со Si_3N_4 како диелектрик е ограничена: кај првите со фактот што едната електрода им е нужно заземјена, а кај вторите поради тоа што бараат дополнителни технолошки постапки.

Независно од типот, монолитните кондензатори се карактеризираат со следниве основни параметри:

- номинална вредност C (pF),
- специфична капацитивност C_o (pF/mm^2),
- фактор на дозволеното отстапување од номиналната вредност $\gamma_C=\gamma\{\Delta C/C\}(\%)$,
- максимален работен напон V_{max}(V),
- температурен коефициент на капацитивноста $TCC=dC/CdT\ (K^{-1})$,
- Q-фактор,
- фактор на дозволеното отстапување од односот на номиналните вредности $\gamma_{C_1/C_2}=\gamma\{\Delta(C_1/C_2)/(C_1/C_2)\}(\%)$.

Номиналните вредности на монолитните кондензатори се мали. Обично се движат од неколку десетици до неколку стотици пикофаради, а многу ретко до неколку илјади пикофаради. Тоа се **должи на малата специфична капацитивност на монолитните кондензатори (типично 100 до 1000 pF/mm^2)** и малата расположлива плоштина на чипот. И покрај малите капацитивности, монолитните кондензатори зафаќаат поголема плоштина од кој и да било друг елемент на монолитните интегрални кола. На пример, плоштината потребна за реализација на еден кондензатор од неколку стотини пикофаради е сосема доволна да се реализираат најмалку 100 npn-транзистори. Поради оваа неекономичност во користењето на површината, употребата на монолитните кондензатори се одбегнува секогаш кога е тоа можно. Тоа се постигнува преку соодветни шематски решенија, карактеристични за монолитната интегрална техника.

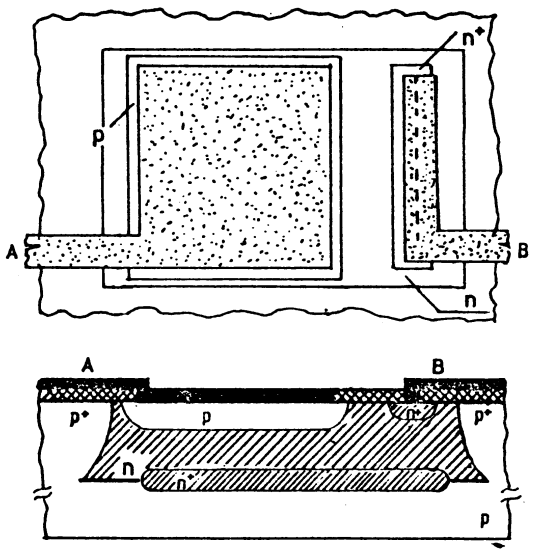
Дифузни кондензатори Според тоа кој pn-спој се користи, разликуваме две основни варијанти на дифузни кондензатори: колекторски кондензатори и емитерски кондензатори. Првите се базирани врз капацитивноста на колекторското преодно подрачје, а вторите - врз капацитивноста на емитерското преодно подрачје. Постојат и дифузни кондензатори базирани врз паралелна употреба на двата pn-споја.

На сликата 4.18 е прикажана типичната структура на колекторскиот кондензатор. За да се обезбеди инверзна поларизација на користениот pn-спој, електродата B, која е споена со колекторското подрачје, треба да биде секогаш на повисок потенцијал од електродата A, која е споена со подрачјето на базната дифузија. Со оглед на малата длабочина на подрачјето на базната дифузија во споредба со неговите планарни димензии, капацитивноста на кондензаторот, во прва апроксимација, ќе биде дадена со изразот:

$$C = C_o S \qquad (4.3.5)$$

каде што C_o е специфичната капацитивност на преодното подрачје во хоризонталниот дел на pn-спојот, а S е плоштината на отворот

за базната дифузија. Капацитивноста C_o, која е функција од приклученият инверзен напон, може да се одреди со помош на Лоренс-Ворнеровите криви. Во табелата 4.6. се дадени типичните вредности на специфичната капацитивност на колекторскиот pn-спој при различни инверзни напони. Максималниот работен напон на колекторскиот кондензатор е ограничен со пробивниот напон на спојот колектор-база, кој изнесува 40 до 50 V.



Сл. 4.18. Колекторски кондензатор

На сликата 4.19 е даден принципиелен приказ на пресекот на емитерскиот кондензатор . За да се обезбеди инверзната поларизација на pn-спојот емитер-база, електродата А треба да биде секогаш на повисок потенцијал од електродата В. Изолацијата на кондензаторот од подлогата се постигнува на тој начин што n-подрачјето на изолационият остров се поставува на највисокиот потенцијал во колото. И кај овој кондензатор приближната вредност на капацитивноста може да се одреди со помош на изразот (4.3.5), каде што C_o е специфичната капацитивност на хоризонталниот дел од преодното подрачје, а S е плоштината на отворот за емитерската дифузија. Во табелата 4.6. се дадени типичните вредности на специфичната капацитивност на емитерскиот pn-спој за V=0 и V=5 V. Очигледно, со оглед на забележително поголемата специфична капацитивност на спојот емитер-база во споредба со спојот колектор-база, емитерскиот кондензатор е попогоден за реализација на поголеми капацитивности од колекторскиот. Но, од друга страна, со оглед на релативно малиот пробивен напон на спојот емитер-база (6 до 8 V),

максималниот работен напон на емитерските кондензатори не е поголем од неколку волти - што секако претставува значајно ограничување во нивната примена.

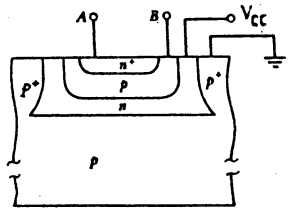
Табела.4.6. Типични вредности на специфичната капацитивност C_o кај колекторскиот и емитерскиот pn-спој, pF/mm^2

Тип на pn-спојот	V=0	V=5 V	V=15 V
колекторски	300	120	90
емитерски	1400	1000	-

Основна карактеристика на разгледуваните дифузни кондензатори е зависноста на нивната капацитивност од приклученият инверзен напон V. Оваа зависност може да се прикаже во обликот

$$C_o = \frac{C_{oo}}{(1+V/V_c)^m} \qquad (4.3.6)$$

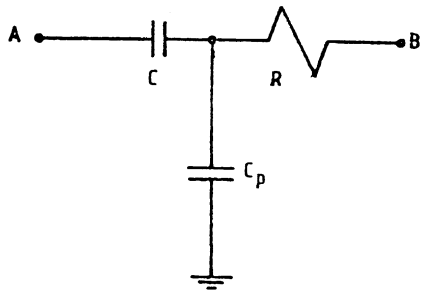
каде што C_{oo} е специфичната капацитивност на неполаризираниот pn-спој, V_c е контактната потенцијална разлика, а степеновиот показател m е затворен во тесната област на вредности $1/3<m<1/2$. Значи, дифузните кондензатори се нелинеарни елементи. Во некои случаи нелинеарноста се покажува како корисна особина. Меѓутоа, многу почесто се потребни линеарни кондензатори, т.е. кондензатори со константни капацитивности, кои променливите компоненти на сигналите ги пропуштаат без нелинеарни изобличувања, а константните компоненти ги блокираат. Дифузните кондензатори можат да вршат таква функција, но само доколку променливата компонента на сигналот е барем неколку пати помала од сумата на неговата константна компонента и контактната потенцијална разлика на pn-спојот.



Сл.4.19.Емитерски кондензатор

Примената на дифузните кондензатори е отежната поради нивната еквивалентна сериска отпорност R и нивната паразитна

капацитивност C_p(сл.4.20). Кај колекторските кондензатори, отпорноста R е главно резултат на отпорноста на колекторското подрачје и обично се движи од 10 до 50 Ω(колекторските кондензатори се изведуваат секогаш со потколекторски n^+-слој, бидејќи без него вредноста на отпорноста R би била поголема барем за еден ред на големина), а капацитивноста C_p одговара на капацитивноста на преодното подрачје меѓу изолациониот остров и подлогата. Кај емитерските кондензатори, отпорноста R одговара на отпорноста на базниот слој, т.е. на отпорноста на подрачјето меѓу емитерскиот и колекторскиот pn-спој, и обично е поголема од 200 Ω, а капацитивноста C_p одговара на капацитивноста на колекторскиот pn-спој. Поради релативно големата еквивалентна сериска отпорност R, Q-факторот (т.е. односот на реактивната и активната компонента на импедансата) кај дифузните кондензатори е значително помал отколку кај дискретните кондензатори.[1/] При честота од 1 MHz, тој се движи од 50 до 100 кај колекторските и од 1 до 20 кај емитерските кондензатори. За честоти поголеми од 10 MHz, дифузните кондензатори стануваат практично неупотребливи, особено емитерските. На пример, при честота од 10 MHz Q-факторот кај колекторските кондензатори се движи од 4 до 30, а кај емитерските од 0,1 до 4. За да се намали дејството на паразитната капацитивност C_p, која го претвора дифузниот кондензатор во кондензаторски напонски делител, потребно е да се намали односот C_p/C. Со оглед на структурата на дифузните кондензатори, очигледно е дека во тој правец не може многу да се направи. За C_p/C се постигнуваат вредности од 0,3 до 0,1 и тоа, пред сè, благодарение на фактот што обично поларизацијата



Сл.4.20. Еквивалентна шема на монолитните кондензатори

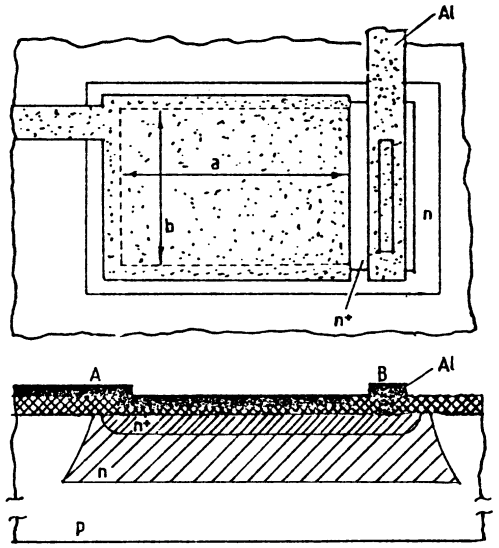
1/ Кај дискретните кондензатори, почесто се користи параметарот $tg\delta=1/Q$, кој е познат како фактор на загубите.

на паразитниот pn-спој е поголема од поларизацијата на корисниот. Температурниот коефициент TCC кај дифузните кондензатори е позитивен и е од ред на големина на $10^{-3}K^{-1}$. Зголемувањето на капацитивноста со температурата се должи пред сè на намалувањето на контактната потенцијална разлика V_c, а во помала мерка и на растењето на релативната диелектричка константа на силициумот. Типичната вредност на факторот на дозволеното отстапување од номиналната вредност γ_C кај дифузните кондензатори изнесува 20%. Отстапувањата се главно резултат на грешки во дифузијата, односно епитаксијата. Факторот γ_{C_1/C_2} обично не ја поминува вредноста од 3%.

MOS-кондензатори MOS-кондензаторите (сл.4.21) се најшироко применувани монолитни кондензатори. Во споредба со дифузните кондензатори, MOS-кондензаторите се карактеризираат со подобри електрични особини: тие се неполаризациони (т.е. секоја од нивните електроди може да биде на повисок потенцијал од другата), имаат поголем Q-фактор, капацитивноста им е (практично) независна од приклучениот напон и имаат помал температурен коефициент. Процесот на изготвувањето на MOS-кондензаторите не бара дополнителни технолошки постапки (т.е. постапки што не се содржани во множеството операции потребни за реализација на останатите елементи на биполарните интегрални кола). Имено, n^+-слојот на кондензаторот се реализира со емитерската дифузија, а тенкиот оксиден слој - со термичката оксидација што следува непосредно по емитерската дифузија. Сепак, со оглед на тоа што од тенкиот оксиден слој се бара висок квалитет, оваа оксидација мора да се врши со посебно внимание и во атмосфера на чист кислород (без водена пареа).

Капацитивноста на MOS-кондензаторот е дадена со релацијата (4.3.5), каде што $C_o=C_{ox}=\varepsilon_{ox}/d_{ox}$ и $S=ab$ се специфичната капацитивност и плоштината на тенкиот оксиден слој. За да се добие што е можно поголема капацитивност потребно е дебелината d_{ox} на оксидниот слој да биде што е можно помала. Минималната дебелина што се користи во практиката е 0,05 μm. Таа е одредена со технолошките можности и барањето за висококвалитетен изола-

ционен слој. Најчесто, меѓутоа, за да се обезбеди поголема надежност и поголем принос [1/], се употребуваат слоеви со дебелина од 0,08 до 0,12 μm. Тоа одговара на специфична капацитивност од околу 280 до 420 pF/mm^2 и пробивен напон од 40 до 60 V.



Сл. 4.21. MOS-кондензатор

Еквивалентата шема на MOS-кондензаторот е идентична со еквивалентната шема на дифузните кондензатори (сл.4.20). Паразитната отпорност R одговара на отпорноста на n^+-слојот под тенкиот оксид, а паразитната капацитивност C_p - на капацитивноста на инверзно поларизираниот изолационен pn-спој. Меѓутоа, за разлика од дифузните кондензатори, овде отпорноста R е значително помала (2 до 5 Ω), што обезбедува и повисок Q-фактор. При честота од 1 MHz Q-факторот кај MOS-кондензаторите обично е поголем од 200, а при честота од 10 MHz најчесто се движи меѓу 20 и 80.

Температурниот коефициент TCC кај MOS-кондензаторот е позитивен и многу мал ($0{,}02\times10^{-3}K^{-1}$), а е резултат на зголемувањето на релативната диелектричка константа на тенкиот оксиден слој со температурата. Типичните вредности на факторите γ_C и γ_{C_1/C_2} се 20% и 3%, соодветно. Релативно големите отстапувања од номиналната вредност најмногу се должат на производствените отстапувања на дебелината на диелектрикот од проектираната вредност.

1/ Однос меѓу бројот на исправните интегрални кола и бројот на вкупно произведените интегрални кола во еден технолошки циклус.

Строго гледано, MOS-кондензаторот не е напонски независна компонента. Имено, при негативни напони меѓу електродата A и електродата B, $V_{AB}<0$, доаѓа до истиснување на основните носители (електроните) од површинскиот слој на полупроводникот, т.е. до осиромашување на тој слој. Со тоа се зголемува ефективната дебелина на кондензаторскиот диелектрик, па капацитивноста на кондензаторот се намалува. Меѓутоа, со оглед на високата концентрација на примеси во полупроводникот (n^+-слојот), дебелината на осиромашениот слој е обично толку мала во споредба со дебелината на тенкиот оксид што нејзиното влијание врз капацитивноста на кондензаторот може сосема да се игнорира. Следува квантитативно образложение.

По дефиниција, специфичната капацитивност на MOS-кондензаторот е дадена со изразот:

$$C_o = -\frac{dQ_s}{dV_G}, \qquad (4.3.7)$$

каде што dV_G е прираст на потенцијалот на електродата A во однос на електродата B, а dQ_s е прираст на индуцираниот полнеж (по единица плоштина) во површинскиот слој на полупроводникот. Комбинирајќи го изразот (4.3.7) со изразот (3.3.24) се добива:

$$\frac{1}{C_o} = -\frac{dV_G}{dQ_s} = \frac{1}{C_{ox}} - \frac{dV_s}{dQ_s} = \frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_s} \qquad (4.3.8)$$

Значи, капацитивноста C_o е сериска комбинација од капацитивноста на оксидниот слој C_{ox} и т.н. површинска капацитивност на полупроводникот, т.е.

$$C_s = -\frac{dQ_s}{dV_s} \qquad (4.3.9)$$

која, согласно со сликата 3.19 и дефиниционниот израз (4.3.9), е функција од V_s и има минимална вредност при $V_s \doteq 2V_{FE}$ (во конкретниот случај, полупроводникот е од n-тип, така што е $V_{FE}<0$). Во подрачјето $2V_{FE}\leq V_s<0$ полнежот Q_s може да се изрази со приближниот израз $Q_s=(2\varepsilon_s qN_D|V_s|)^{1/2}$ па, врз основа на (4.3.9) и (3.3.35), се добива:

$$C_{s(min)} = C_s\Big|_{V_s=2V_{FE}} = \left(\frac{q\varepsilon_s N_D}{4|V_{FE}|}\right)^{1/2} = \frac{\varepsilon_s}{x_{dmax}} \qquad (4.3.10)$$

За $N_D > 10^{20} cm^{-3}$ (концентрацијата на примеси во површинскиот слој на емитерската дифузија достигнува до $10^{21} cm^{-3}$) $C_{s(min)}$ има вредности од ред на големина $10 nF/mm^2$, или поголеми. Тоа значи дека површинската капацитивност C_s е многу поголема од вообичаените вредности на специфичната капацитивност на тенкиот оксиден слој . Според тоа, може да се заклучи дека кај MOS-кондензаторите е $C_o \doteq C_{ox}$, при кој и да било работен напон.

4.4. MOS-интегрални кола [1-16]

Во принцип, MOS-транзисторите и биполарните транзистори можат да се изготвуваат на заедничка подлога, во единствен технолошки циклус. Меѓутоа, таквата можност во практиката обично не се користи, или се користи само во исклучителни случаи, т.е.,по правило, биполарните интегрални кола и MOS-интегралните кола се изведуваат одвоено.Иако овозможуваат решавање на истите или на слични функционални задачи, овие две технологии меѓусебно не се исклучуваат, ниту пак си конкурираат. Напротив, постојните разлики во нивните особини ги прават меѓусебно комплементарни, т.е. ги зголемуваат можностите на микроелектрониката како целина. Биполарната технологија, чии главни одлики се големата брзина на работа, линеарноста на статичките карактеристики, малите излезни импеданси на засилувачките и излезните степени и разнообразноста (богатството) на елементи, доминира во подрачјето на аналогните склопови и во подрачјето на дигиталните склопови со мал или среден степен на интеграција. Од друга страна, MOS-технологијата е неприкосновена кога се работи за дигитални кола со голем, а особено со многу голем степен на интеграција. Тоа се должи, пред сè, на нејзината едноставност и малите димензии на елементите.

Во табелата 4.7. е дадена споредба на некои од основните карактеристики и параметри на биполарните и MOS-интегралните кола. Она што паѓа во очи, покрај значително помалите димензии

на MOS-транзисторите во споредба со биполарните транзистори, е суштествено помалиот број критични технолошки постапки кај MOS-технологијата.Се смета дека биполарната технологија е за 30 до 50% посложена отколку MOS-технологијата. Грубо земено, брзината на работата на MOS-интегралните кола е за еден ред на големина помала отколку кај биполарните, што секако претставува значаен недостаток. Но, од друга страна, потрошувачката на моќност кај MOS-интрегралните кола е многу помала отколку кај биполарните интегрални кола[1/]. Тоа е голема предност кога се работи за реализација на кола со големи степени на интеграција, бидејќи дисипацијата на моќност се јавува како битен ограничувачки фактор во однос на зголемувањето на густината на пакувањето. Со дополнителни технолошки постапки можат да се реализираат MOS-транзистори и склопови чии брзини на работа се приближно еднакви на оние што се постигнуваат кај биполарните интегрални кола, но со дополнителните постапки се нарушува технолошката едноставност, т.е. се загубува една од најголемите предности на MOS-технологијата.

Табела 4.7. Споредба на биполарните и MOS-интегралните кола

Карактеристика и параметар	Биполарни интегрални кола	MOS-интегрални кола
Плоштина по транзистор, μm^2	2500 до 15000	100 до 1000
Потребна моќност по логичка порта, mW [2/]	2,5 до 30	0,1 до 0,2
Време на пропагација по логичка порта, ns [2/]	1 до 10	20 до 30
Број на дифузни постапки	4	1 до 3
Број на фотолитографски постапки	7 до 8	4 до 5

1/ Исклучок од ова се I^2L-колата кои, иако биполарни (нестандардни), имаат најмала потрошувачка на моќност, но исто така и прилично големо време на пропагација (25 до 250 ns)

2/ Податоците се однесуваат на стандардните биполарни интегрални кола и на стандардната NMOS-технологија со алуминиумски или силициумски гејт.

Една од основните карактеристики на MOS-интегралните кола е малиот број различни елементи. Всушност MOS-интегралните кола не содржат други елементи освен еден или два типа MOS-транзистори. На пример, CMOS-колата се состојат само од парови на n-канални и p-канални MOS-транзистори со индуциран канал. NMOS- и PMOS-колата обично се составени само од транзистори со индуциран канал или од транзистори со индуциран и транзистори со вграден канал. Кај овие кола понекогаш се применуваат и имплантирани отпорници, но во најголемиот број случаи во улогата на товарни елементи, т.е. отпорници, се користат соодветни споеви на MOS-транзистори. За таква намена се особено погодни MOS-транзисторите со вграден канал. Нивната струјно-напонска карактеристика - кога се споени како двокрајници минува низ координатниот почеток и е практично линеарна во доволно широк опсег на работниот напон. Замената на отпорниците со MOS-транзистори е еден од основните фактори врз кои се темели постигнувањето поголеми густини на пакување во MOS-технологијата отколку во биполарната технологија. Последново е разбирливо ако се има предвид фактот дека плоштината што ја зафаќаат одделните MOS-транзистори во MOS-интегралните кола е неспоредливо помала од плоштината што ја зафаќаат отпорниците во биполарните интегрални кола, особено кога се работи за високоомски отпорници. При иста функционална сложеност, плоштината на MOS-интегралните кола не преминува 20% од плоштината на биполарните интегрални кола.

MOS-интегралните кола се поедноставни од биполарните не само во технолошки туку и во тополошки и шематски поглед. Тоа се должи на следниве нивни особености:

- За разлика од биполарните интегрални кола, кај MOS-интегралните кола нема потреба одредени делови на некои интегрални елементи да се спојуваат кратко со подлогата, односно со напојувањето. (Како што беше изнесено во 4.3., кај некои од биполарните интегрални елементи таквите споеви се неопходни за да се обезбеди потребната изолација на нивните активни слоеви од околната средина. На пример, во случајот на базните отпорници, n-подрачјето на изолациониот остров треба да се постави на највисокиот потенцијал во колото, т.е. да се спои со напојната линија, а во случајот на емитерските отпорници, уште и подрачјето на базната дифузија треба да се спои со подлогата);
- Основните карактеристики на структурата и релативно малите износи на струите даваат можност кај MOS-интегралните кола, покрај метализационата мрежа, за меѓусебно спојување на елементите да се користи и друга, т.н. тунелска мрежа. Оваа мрежа се состои од дифузни спојни линии кои се формираат со истата дифузна постапка со која се создаваат и подрачјата на сорсот и дрејнот. Со оглед на тоа што кај тунелската мрежа не се јавуваат контакти меѓу различни материјали, нејзиното користење фактички значи намалување на вкупниот број спојни контакти во колото;
- Големата влезна отпорност на MOS-транзисторите овозможува да се реализираат логички кола со голем фактор на разгранување. Големиот фактор на разгранување поволно влијае врз намалувањето на бројот на потребните интегрални елементи и спојни патеки за реализацијата на одредена електрична функција.

Една од карактеристиките на MOS-интегралните кола е релативната едноставност на нивниот развоен процес. Со други зборови, постои голема веројатност дека веќе во првиот обид, т.е. со првата пробна серија, ќе бидат постигнати сите поставени барања во поглед на функционирањето и перформансите на развиваното коло. Ова главно се должи на релативно едноставната структура на MOS-интегралните кола, односно на релативно едноставните релации меѓу нивните електрични и геометриски параметри. На пример, додека факторот на струјното засилување кај биполарните транзистори е аналитички тешко предвидлив и тешко се контролира, поради неговата сложена зависност од технолошките и геометриските параметри, такви проблеми нема со соодветниот параметар на MOS-интегралните кола, т.е. со стрмнината; доволно е само да се променат димензиите на каналот, на пример широчината, па стрмнината да се доведе до бараната вредност.

MOS-интегралните кола се одликуваат со поголем принос, поголема надежност и пониска цена од соодветните (по намена и комплексност) биполарни интегрални кола. Поголемиот принос е последица на помалиот број технолошки операции (пред сè на помалиот број

дифузни и фотолитографски постапки). Поголемата надежност е главно резултат на поедноставната технолошка и тополошка структура (пред сè на помалиот број контакти меѓу различни материјали). Пониската цена е резултат на поедноставната технологија, поголемиот принос, поголемата густина на пакување и помалите развојни трошоци.

4.4.1. MOS-транзистори

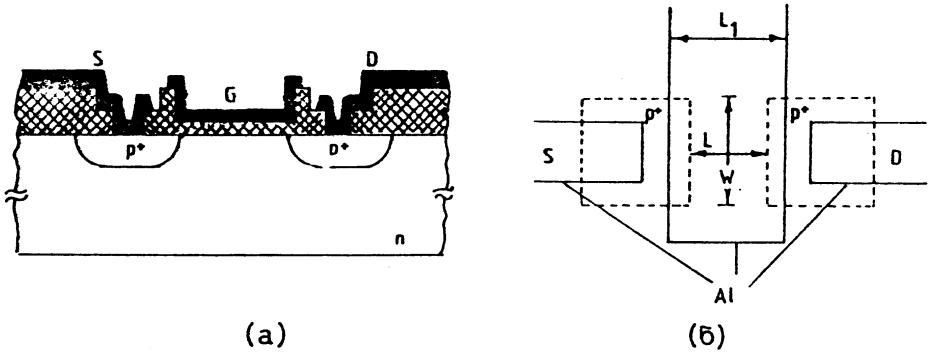
Како што е познато, постојат два основни вида MOS-транзистори: n-канални и p-канални. Притоа, и едните и другите можат да бидат изведени како елементи со индуциран канал или како елементи со вграден канал. n-каналните MOS-транзистори со индуциран канал имаат позитивен праговен напон[1/], а оние со вграден канал - негативен праговен напон. Значи, кај n-каналните елементи со индуциран канал, при краток спој на сорсот со подлогата, потребно е на гејтот да се доведе позитивен напон (мерен во однос на сорсот и подлогата), кој е поголем од праговниот напон, за меѓу дрејнот и сорсот да се индуцира канал. Од друга страна, кај елементите со вграден канал, меѓу дрејнот и сорсот постои канал и тогаш кога напонот на гејтот е еднаков на нула. Аналогно, p-каналните MOS-транзистори со индуциран канал имаат негативен праговен напон, а оние со вграден канал - позитивен праговен напон; кај првите, каналот се индуцира тогаш кога напонот на гејтот ќе стане понегативен од праговниот напон, додека, кај вторите, каналот постои и тогаш кога напонот на гејтот е еднаков на нула.

Ако се исклучат специјалните (нестандардните) MOS-технологии, можат да се разликуваат два, суштински различни, процеса на изготвување MOS-транзистори и согласно со тоа - две стандардни изведби на MOS-транзистори: MOS-транзистори со алуминиумски гејт и MOS-транзистори со силициумски гејт.

MOS-транзистори со алуминиумски гејт На сликата 4.22 е даден напречниот пресек и тополошката конфигурација на еден p-канален MOS-транзистор

1/ Под праговен напон на даден MOS-транзистор го подразбираме праговниот напон на соодветната MOS-структура - дефинирана со гејтот, тенкиот оксид и подлогата на MOS-транзисторот.

со алуминиумски гејт. Наполно иста структура има и n-каналниот MOS-транзистор со алуминиумски гејт, со таа разлика, се разбира, што кај него типот на проводноста на подлогата, односно на подрачјата на сорсот и дрејнот е обратен.



Сл.4.22. Напречен пресек (а) и топологија (б) на стандарден PMOS-транизстор со алуминиумски гејт

Подрачјата на сорсот и дрејнот се високолегирани, со типична длабочина од околу 2 μm и типична слојна отпорност од околу 100 Ω/□ кај p-каналните и од околу 10 Ω/□ кај n-каналните MOS-транзистори.Типичното растојание меѓу подрачјата на сорсот и дрејнот, т.е. должината на каналот L, кај MOS-транзисторите што се употребуваат како активни елементи изнесува 5 μm. Дебелината на тенкиот оксиден слој под гејтот обично се наоѓа во границите од 0,08 до 0,12 μm, што одговара на пробивен напон меѓу гејтот и подлогата од 40 до 60 V. Концентрацијата на примеси во подлогата е од суштинско значење за својствата на MOS-транзисторот. Имено, од неа зависи праговниот напон, карактеристичната константа k'[1/] и пробивниот напон меѓу дрејнот и подлогата. Обично, нивото на легираност на подлогата се избира меѓу 10^{15} и 10^{16} cm^{-3}, што одговара на пробивен напон меѓу дрејнот и подлогата од 20 до 30 V.

Согласно со изразот (3.3.40), праговниот напон кај p-каналните MOS-транзистори може да биде само негативен (сите собироци на десната страна се негативни), додека праговниот напон кај n-каналните MOS-транзистори може да биде позитивен или негативен, зависно

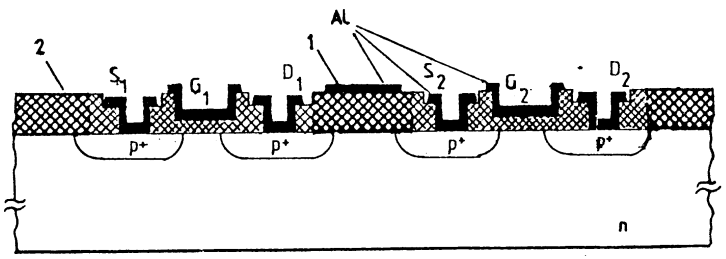
1/ $k=\mu\varepsilon_{ox}W/2d_{ox}L$

од примесната концентрација во подлогата, плоштинската густина на површинскиот полнеж Q_{ss} и дебелината на оксидниот слој под гејтот. Со други зборови, p-каналните MOS-транзистори - доколку во подрачјето на каналот не се внесат примеси од p-тип - можат да бидат само транзистори со индуциран канал, додека n-каналните MOS-транзистори можат да бидат транзистори со индуциран канал или транзистори со вграден канал. Во табелата 4.8 се наведени праговните напони, пресметани според изразот (3.3.40), за даден p-канален и даден n-канален MOS-транзистор со дебелина на оксидниот слој под гејтот d_{ox}=0,1 μm, при две различни нето-примесни концентрации на подлогата и при две различни густини на површинскиот полнеж Q_{ss}. Q_{ss}=1,5x10^{-9}C/cm^2 одговара на најмалата густина на површинскиот полнеж што може да се постигне во современото процесирање, и тоа при кристалната ориентација (100), а вредноста Q_{ss}=30x10^{-9}C/cm^2 се јавува како типична за ориентацијата (111). Табелата јасно го покажува големото влијание на површинскиот полнеж врз праговниот напон. Исто така се гледа дека изработката на n-канален MOS-транзистор со праговен напон поголем од 1 V бара редуцирање на површинскиот полнеж Q_{ss} на најмалата можна вредност и избирање подлога со поголема примесна концентрација. Зголемувањето на примесната концентрација, меѓутоа, носи со себе значајни негативни ефекти - ја намалува површинската подвижност на електроните (што значи и брзината на работа на елементот), го намалува пробивниот напон меѓу дрејнот и подлогата и ја зголемува паразитната капацитивност меѓу дрејнот и подлогата.

Табела. 4.8. Праговен напон кај MOS-транзисторите при дебелина на оксидниот слој d_{ox}=0,1 μm

Тип на транзисторот	Q_{ss} = 30x10^{-9}Ccm^{-2}		Q_{ss} = 1,5x10^{-9}Ccm^{-2}	
	N_n=10^{15} cm^{-3}	N_n=10^{16} cm^{-3}	N_n=10^{15} cm^{-3}	N_n=10^{16} cm^{-3}
p-канален	-2,19 V	-3,27 V	-1,35 V	-2,43 V
n-канален	-0,79 V	0,29 V	0,05 V	1,13 V

Со оглед на големата густина на пакување кај MOS-интегралните кола, проводните патеки што минуваат меѓу два соседни MOS-транзистора можат да доведат до создавање паразитни MOS-транзистори (сл.4.23). Негативното влијание на паразитните транзистори врз работата на колото може да се спречи ако се обезбеди нивниот праговен напон да биде доволно висок (кај PMOS-колата доволно негативен, а кај NMOS доволно позитивен) за да не дојде до создавање на паразитни канали меѓу соседните транзистори при постојните напони во колото. Тоа обично се постигнува со доволно дебел (1 до 1,5 μm) заштитен оксиден слој. На пример, согласно со изразот (3.3.40), праговниот напон на паразитните транзистори кај дадено NMOS-коло, со дебелина на заштитниот оксиден слој од 1,5 μm, со нето-примесна концентрација во подлогата N_n=N_A=10^{16}cm^{-3} и со плоштинска густина на површинскиот полнеж Q_{ss}=1,5x10^{-9}Ccm^{-2}, изнесува околу 20 V. Кај PMOS-коло со истите параметри соодветната вредност би била околу -23 V. Не е тешко да се заклучи дека кај NMOS-колата со слабо легирана подлога (со примесна концентрација од ред на големина 10^{15}cm^{-3}) или со недоволно редуциран површински полнеж Q_{ss}, зголемувањето на дебелината на оксидниот слој не помага. Имено, кај нив, праговниот напон на паразитните транзистори не само што нема да биде доволно висок туку може да биде и негативен, т.е. можат да постојат паразитни канали и тогаш кога колото не е под напон. Во вакви случаи паразитните канали се елиминираат со поставување на т.н. стоп-канални p^+-подрачја околу MOS-транзисторите.



Сл.4.23. Паразитен транзистор меѓу два соседни p-канални транзистори
1 - проводна патека
2 - заштитен оксиден слој

Честотните својства на интегралните MOS-транзистори се карактеризираат со т.н. фактор на широкопојасната F_o. Овој параметар е дефиниран како продукт од нискочестотното напонско засилување $A=g_m R_L$ и граничната честота $f_b=1/2\pi C_L R_L$ на соодветен едноставен засилувачки степен во спој со заеднички сорс, т.е.

$$F_o = Af_b = \frac{g_m}{2\pi C_L} \qquad (4.4.1)$$

Овде, g_m е стрмнината на MOS-транзисторот, а R_L и C_L се товарната отпорност и товарната капацитивност. Капацитивноста C_L може да се расчлени како што следува:

$$C_L = C_{gc}+C_{gs}+K_m C_{gd}+C_m+C_{ds} \qquad (4.4.2)$$

каде што C_{gc}, C_{gs} и C_{gd} се капацитивностите меѓу гејтот и каналот, гејтот и сорсот и гејтот и дрејнот , респективно, C_m е капацитивноста - во однос на подлогата - на металната лента со која се поврзани соседните степени (специфичната капацитивност овде е одредена со заштитниот оксиден слој), C_{ds} е капацитивноста меѓу дрејнот и подлогата, а K_m е фактор со кој се зема предвид Милеровиот ефект.

Ако се претпостави дека MOS-транзисторот работи во подрачјето на константна струја, изразот (4.4.1) може да се прикаже во обликот:

$$F_o = \frac{g_m}{2\pi C_{gc}} \frac{C_{gc}}{C_L} = \frac{\mu}{2\pi L^2} \frac{C_{gc}}{C_L}(V_{GS}-V_{TH}) \qquad (4.4.3)$$

од каде што се гледа дека факторот на широкопојасноста, а според тоа и квалитетот на MOS-транзисторот, може да се зголеми со максимизирање на површинската подвижност на основните носители μ и на односот C_{gc}/C_L и со минимизирање на должината на каналот L.

При вообичаени примесни концентрации во подлогата, површинската подвижност на електроните е 2 до 3 пати поголема од површинската подвижност на празнините. Според тоа, при исти други услови, n-каналните MOS-транзистори имаат околу 2 до 3 пати поголем F_o од p-каналните MOS-транзистори. Тоа е основната причина што NMOS-технологијата сè повеќе ги зацврстува своите позиции, а PMOS-технологијата се претвора во работа на минатото[1/]. Треба, меѓутоа, да се има предвид дека ако кај n-каналните MOS-транзистори се оди на подлоги со поголеми примесни концентрации од $10^{16}cm^{-3}$, со цел да се добие праговен напон повисок од 1 V, предноста во поглед на факторот F_o се губи, бидејќи со зголемувањето на примесната концентрација доаѓа до намалување на површинската подвижност на електроните. Во практиката, праговниот напон на n-каналните MOS-транзистори со индуциран канал се движи од 0,5 до 1 V, што обезбедува задоволителна стабилност во работењето и двојно поголем F_o отколку кај p-каналните MOS-транзистори.

Вредноста на односот C_{gc}/C_L, која во идеален случај би требало да биде еднаква на единица, обично е помала од 0,2. Тоа се должи на неизбежното присуство на паразитните капацитивности C_{gs}, C_{gd}, C_m и C_{ds}, при што, поради Милеровиот ефект, најголемо е влијанието на капацитивноста C_{gd}. Капацитивностите C_{gd} и C_{gs} се од ист ред на големина и се главно резултат на преклопувањата на гејтот со подрачјата на дрејност и сорсот, респективно. Затоа се настојува овие преклопувања да бидат што е можно помали. Во овој поглед, меѓутоа, постојат граници што не можат да се поминат. Така, на пример, технологијата на изготвување MOS-транзистори со алуминиумски гејт бара ширината на гејтот L_1 да биде за најмалку 5 μm поголема од должината на каналот L(сл.4.22-б), за со доволно голема веројатност да се исклучи можноста дел од каналот да остане непрекриен со метал поради грешки во совпаѓањето на маската со која се реализираат подрачјата на сорсот и дрејнот и маската со која подоцна се реализира гејтот. Значи, кај MOS-транзисторите со алуминиумски гејт, просечното преклопување на гејтот со сорсот односно со дрејнот изнесува, барем. 2,5 μm.

Очигледно, најголемо влијание врз факторот F_o има должината на каналот L. Како што рековме, типичната вредност на L кај

1/ NMOS-трехнологијата има и други предности во однос на PMOS-технологијата. Имено, таа е компатибилна со TTL-техниката (што не е случај со PMOS-технологијата) и овозможува за околу 30% поголема густина на пакување од PMOS-технологијата. (Поголемата подвижност на електроните во споредба со празнините дозволува ширината на каналот кај n-каналниот MOS-транзистор да биде двапати помала од ширината на каналот кај p-каналниот MOS-транзистор, а сепак - при исти други услови - карактеристичната константа на n-каналниот MOS-транзистор да не биде помала од карактеристичната константа на p-каналниот.)

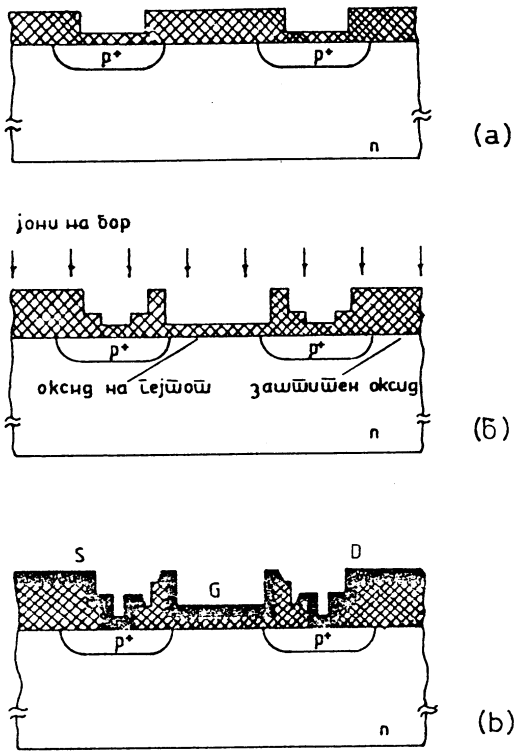
стандардните MOS-транзистори со алуминиумски гејт е 5 μm. Можно е да се реализираат MOS-транзистори и со многу пократки канали (L<1μm). Но, тоа бара да се оди на многу посложени структури отколку што е структурата на сликата 4.22. Примери на такви структури се DMOS (MOS-елемент со двојна дифузија) и VMOS (MOS-елемент со V-жлеб).

За да го оцениме редот на големина на факторот на широкопојасната F_o кај MOS-транзисторите се алуминиумски гејт, нека претпоставиме дека е μ=400 cm^2/Vs (површинската подвижност на празнините се движи од 150 до 250 cm^2/Vs, а на електроните од 300 до 600 cm^2/Vs), L=5 μm, $V_{GS}-V_{TH}=3$ V и $C_{gc}/C_L=0,15$. Ако овие вредности се заменат во (4.4.3), ќе се добие F_o=15 MHz. Тоа значи дека при напонско засилување еднакво на 15 ширината на пропусниот опсег би изнесувала околу 7,5 MHz.

Изготвување на MOS-транзисторите со алуминиумски гејт [2-6] На сликата 4.24 се прикажани основните чекори од технолошката секвенца на изработка на p-канални MOS-транзистори со алуминиумски гејт. Појдовен материјал е подлога од n-тип со соодветна концентрација на примеси. Врз подлогата, со термичка оксидација, се нараснува слој од SiO_2 со дебелина од 0,5 μm. По фотолитографски пат се дефинираат подрачјата на сорсот и дрејнот и низ соодветните отвори се врши двочекорна дифузија на бор. Чекорот на редистрибуцијата се изведува во оксидациона атмосфера за дебелината на оксидниот слој да нарасне од 0,5 μm на 1,3 до 1,5 μm(сл.4.24-а) [1]. По фотолитрографски пат се отстранува оксидниот слој од подрачјето каде што треба да се постави гејтот и истовремено се отвораат контактни отвори во подрачјата на сорсот и дрејнот. Потоа, со висококвалитетна термичка оксидација, во атмосфера на чист (сув) кислород, се нараснува тенкиот оксиден слој на гејтот (сл.4.24-б). Со трета фотолитографска постапка се отстранува тенкиот оксиден слој од контактните отвори. Конечно, се реализира метализационата мрежа, на наполно ист начин како кај биполарните интегрални кола (сл.4.24-в).

1/ Некои производители дебелината на оксидниот слој ја зголемуваат по пат на депозиција.

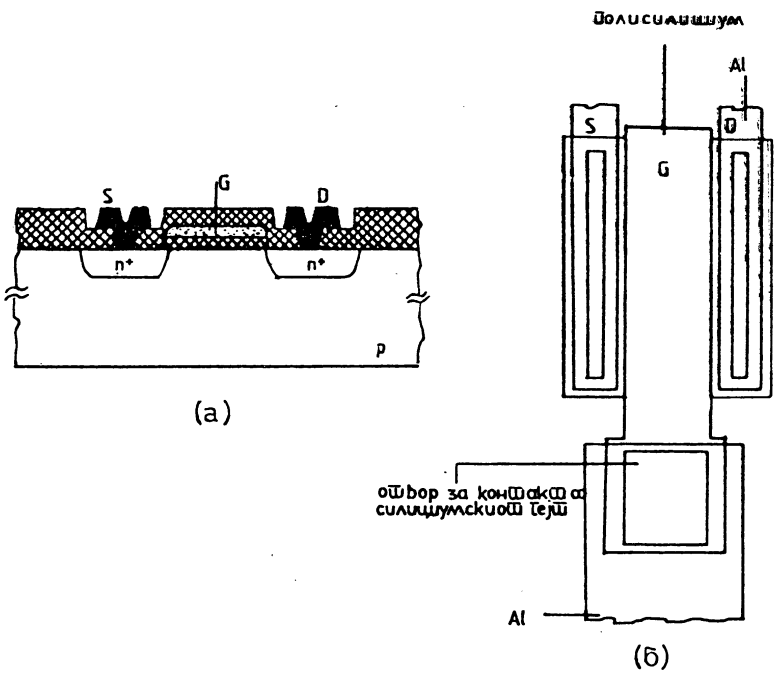
Од наведените постапки, како најкритична се јавува постапката со која се реализира тенкиот оксиден слој во подрачјето на гејтот. Овој слој мора да биде чист, без пукнатини, униформен во поглед на дебелината и да има добри диелектрички карактеристики. Толеранциите во дебелината треба да бидат мали, бидејќи дебелината директно влијае врз вредноста на праговниот напон.



Сл.4.24. Технолошка секвенца на изработка на PMOS-кола со алуминиумски гејт

На сличен начин се изработуваат и NMOS-колата со алуминиумски гејт. Кај нив се тргнува од подлога со проводност од p-тип, а подрачјата на дрејнот и сорсот се реализираат со n^+-дифузија на фосфор. Доколку се потребни и стоп-канални p^+-подрачја, се врши уште и p^+-дифузија.

MOS-транзистори со силициумски гејт На сликата 4.25 е даден напречниот пресек и тополошката конфигурација на еден n-канален MOS-транзистор со силициумски гејт. Наполно иста структура има и p-каналниот MOS-транзистор со силициумски гејт. Основна особеност на овие транзистори е тоа што гејтот им е реализиран од високолегиран поликристален силициум од истиот тип проводност како и подрачјата на сорсот и дрејнот. Значи, кај n-каналните транзистори гејтот е полупроводник од n-тип, а кај p-каналните транзистори гејтот е полупроводник од p-тип. Дебелината на слојот од поликристален силициум е типично 0,6 μm. Неговата слојна отпорност кај n-каналните MOS-транзистори обично изнесува 20 до 30 Ω/□, а кај p-каналните е неколку пати поголема.



Сл.4.25. Напречен пресек (а) и топологија (б) на стандарден NMOS-транзистор со силициумски гејт

Во поглед на карактеристиките на подрачјата на дрејнот и сорсот, како и во поглед на должината на каналот, дебелината на тенкиот оксиден слој под гејтот, примесната концентрација во подлогата, дебелината на заштитниот оксиден слој и пробивните напони меѓу гејтот и подлогата и дрејнот и подлогата, нема суштинска разлика меѓу MOS-транзисторите со алуминиумски и MOS-транзисторите со силициумски гејт. Постојат, меѓутоа, одредени разлики во праговните напони и во факторот на широкопојасноста, кои им даваат предност на MOS-транзисторите со силициумски гејт, што, се разбира, се плаќа со нешто посложена технологија.

Изразот за праговниот напон кај MOS-транзисторите со силициумски гејт се добива ако во релацијата (3.3.39) работната функција на гејтот ϕ_m се замени со работната функција на високолегираниот поликристален силициум, која, согласно со (3.3.16), е дадена со $\chi+E_G/2q+V_{FEG}$. Имено,

$$V_{TH} = -\frac{Q_s(2V_{FE})+Q_{ss}}{\epsilon_{ox}} d_{ox}+V_{FE}+V_{FEG} \qquad (4.4.4)$$

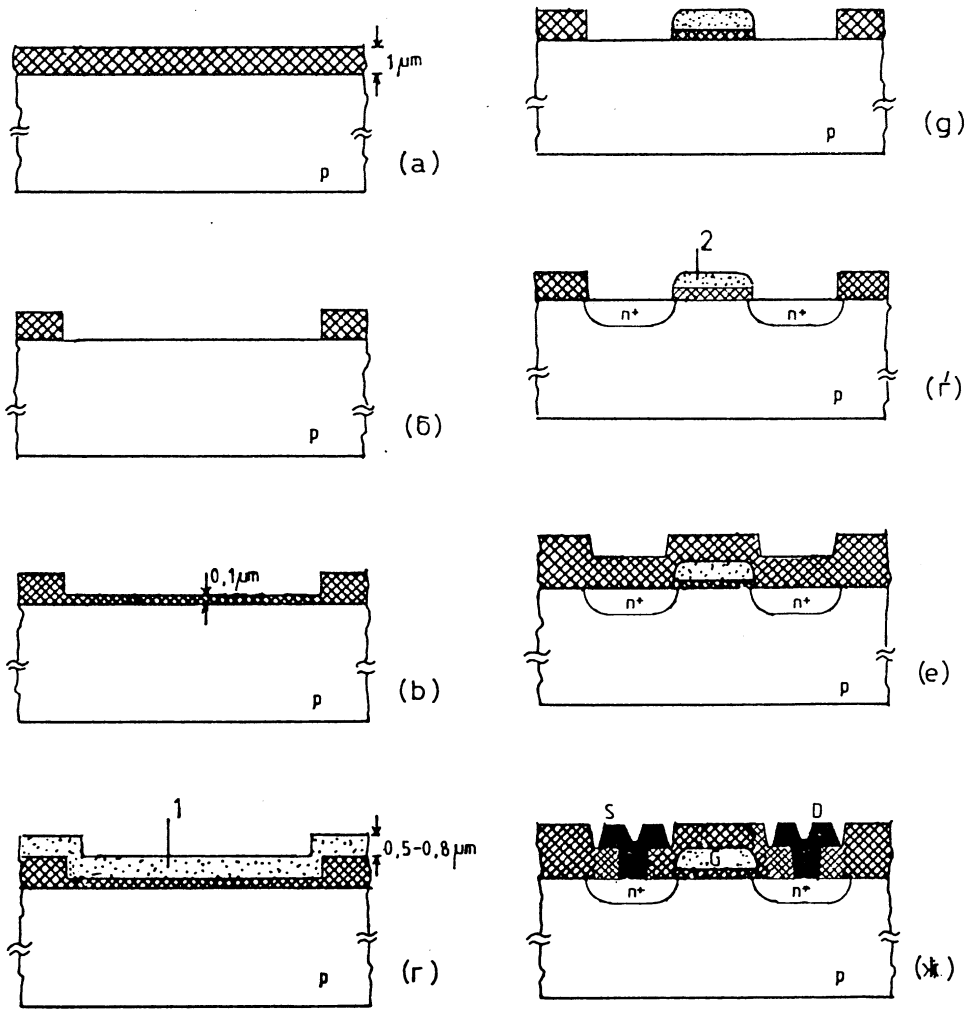
Споредувајќи го овој израз со (3.3.40), заклучуваме дека разликата меѓу праговниот напон на MOS-транзисторите со силициумски гејт и MOS-транзисторите со алуминиумски гејт, при исти други услови, е:

$$\Delta V_{TH} = V_{FEG}+0,61 \text{ V} \qquad (4.4.5)$$

Типичната вредност на V_{FEG} кај n-каналните MOS-транзистори изнесува -0,50 V, а кај p-каналните 0,50 V. Според тоа, гледано алгебарски, замената на алуминиумскиот гејт со силициумски го зголемува праговниот напон кај n-каналните транзистори за 0,11 V, а кај p-каналните за 1,11 V, што може да се смета како позитивен ефект. Ова особено важи за случајот на p-каналните MOS-транзистори кај кои значајната вредност на прирастот ΔV_{TH} овозможува да се добијат доволно мали (негативни) праговни напони и тогаш кога површинскиот полнеж Q_{ss} не е сосема редуциран.

Факторот на широкопојасноста F_o кај MOS-транзисторите со силициумски гејт е, типично, за 50 до 100% поголем отколку кај соодветните MOS-транзистори со алуминиумски гејт. Тоа се должи на релативно малото преклопување на гејтот со подрачјата на сорсот и дрејнот, што кај овие транзистори се постигнува со постапката на самоизрамнување, која се состои во користење на гејтот како маска за реализација на подрачјата на сорсот и дрејнот. Имено, преклопувањето на гејтот со подрачјата на сорсот и дрејнот кај MOS-транзисторите со силициумски гејт е обично 2 до 3 пати помало отколку кај MOS-транзисторите со алуминиумски гејт и е резултат само на страничната дифузија на внесените примеси.

Изготвување на MOS-транзисторите со силициумски гејт [1,3,4] На сликата 4.26 се прикажани основните чекори од технолошката секвенца на изработка на n-канални MOS-транзистори со силициумски гејт. Појдовниот материјал е подлога од p-тип со соодветна концентрација на примеси. Со термичка оксидација, врз подлогата се формира слој од силициумдиоксид со дебелина од 1 μm (сл.4.26-а). По фотолитографски



Сл.4.26. Технолошка секвенца на изработка на NMOS-кола со силициумски гејт
1-полисилициум; 2-легиран полисилициум

пат, во оксидниот слој се отвора отвор на местото каде што треба да биде формиран транзисторот (сл.4.26-б). Со висококвалитетна термичка оксидација, во отворот се нараснува оксиден слој со дебелина од околу 0,1 μm кој ќе ја врши улогата на тенок оксид под гејтот (сл.4.26-в). По пат на хемиско напарување, над целиот оксиден слој се нараснува слој од поликристален силициум со дебелина од 0,5 до 0,8 μm (сл.4.26-г). Следува прекривање на плочката со слој од силициумдиоксид, за потоа, со помош на фотолитографска постапка, од него да се формира маска за отстранување на поликристалниот силициум од сите места, освен од подрачјето на гејтот. По отстранувањето на непотребните делови на поликристалниот силициум, се отстрануваат, по пат на нагризување, и деловите на тенкиот оксиден слој што не се покриени со поликристален силициум. Со тоа се добиваат отворите за формирање на подрачјата на дрејнот и сорсот (сл.4.26-д)[1/]. По пат на двочекорна дифузија на фосфор, се формираат подрачјата на дрејнот и сорсот. Притоа, истовремено се легира и поликристалниот силициум, кој ќе врши функција на гејт (сл.4.26-ѓ). Следува прекривање на целата плочка со оксиден слој, со што поликристалниот силициумски гејт станува опкружен од сите страни со силициумдиоксид (сл.4.26-е). Конечно, на вообичаен начин, се отвораат контактните отвори на сорсот и дрејнот и контактниот отвор на силициумскиот гејт (сл.4.25-б) и се формира металната мрежа (сл.4.26-ж).

На сличен начин се формираат и p-каналните MOS-транзистори со силициумски гејт.

Треба да се забележи дека овде, за разлика од процесот на добивање на MOS-транзисторите со алуминиумски гејт, подрачјата на сорсот и дрејнот се формираат по формирањето на гејтот, со што, всушност, настанува ефектот на самоизрамнување на гејтот во однос на подрачјата на сорсот и дрејнот. Не е тешко да се констатира дека самоизрамнувањето не може да се реализира ако наместо полисилициумски се користи алуминиумски гејт. Имено, ако поликристалниот силициум се замени со алуминиум, ќе дојде до целосно уништување на гејтот за време на дифузијата на фосфор (сл.4.26-ѓ), бидејќи точката на топењето на алуминиумот (600°C) е многу пониска од температурата на дифузијата (околу 1100°C). Можно е, меѓутоа, поликристалниот силициум да се замени со тешко топливи метали; на пример, со молибден или волфрам. На таков начин се прават т.н. RMOS-транзистори.

1/ При нагризувањето на тенкиот оксид, ќе дојде до соодветно (релативно мало) намалување на дебелината на заштитниот оксиден слој.

За реализација на MOS-транзисторите со силициумски гејт се потребни четири фотолитографски постапки и една дифузија,т.е. исто толку колку што е потребно за реализација на MOS-транзисторите со алуминиумски гејт.

4.4.2. Примена на јонската имплантација во MOS-интегралната технологија [1-5]

Техниката на јонска имплантација има голема примена во производството на MOS-интегрални кола, што е резултат на следниве нејзини одлики:

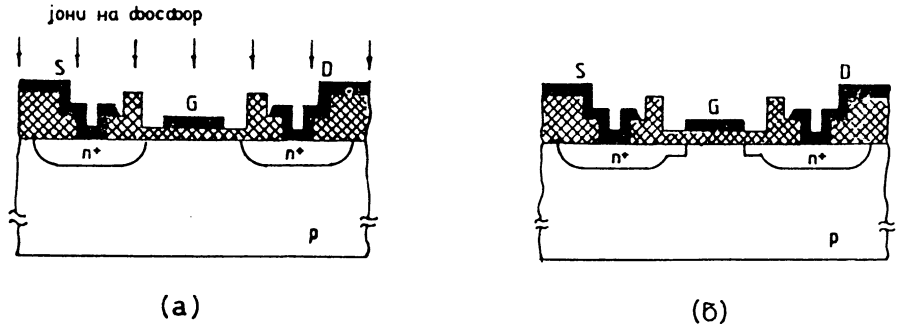
- прецизна и релативно едноставна контрола врз количеството и врз длабочината на внесување на имплантираните примеси,
- процесот се одвива при релативно ниски температури,
- внесувањето примеси не е проследено со странична дифузија,
- предепозицијата може да се врши и преку тенок оксиден слој.

Овие особини на јонската имплантација овозможуваат реализација на MOS-транзистори со произволно избран и прецизно одреден праговен напон и со практично идеална израмнетост на гејтот во однос на подрачјата на сорсот и дрејнот, и тоа во рамките на стандардните технолошки постапки.

Праговниот напон се нагодува со имплантација на соодветни примеси во подрачјето на каналот. Постапката се изведува непосредно пред нанесувањето на гејтот. Имплантацијата на акцепторски атоми доведува до зголемување на алгебарската вредност на праговниот напон, а имплантацијата на донорски примеси - до намалување. Така, имплантацијата на бор го намалува релативно големиот негативен праговен напон кај p-каналните MOS-транзистори,односно ги претвора p-каналните MOS-транзистори во структури со вграден канал доколку површинската густина на имплантираните атоми стане доволно голема за праговниот напон да прими позитивен знак. Кај n-каналните MOS-транзистори, имплантацијата на бор овозможува да се постигнат доволно големи позитивни праговни напони, а имплантацијата на фосфор се користи при реализацијата на структури со вграден канал. Очигледно,

примената на јонската имплантација претставува вистинско решение на проблемот на реализација на MOS-транзистори со индуциран и вграден канал во заедничка подлога.

На сликата 4.27 е прикажан начинот на кој се остварува самоизрамнувањето на гејтот во однос на сорсот и дрејнот со вклучување на техниката на јонска имплантација во стандардната постапка на реализација на MOS-транзистори со алуминиумски гејт. Технолошката секвенца е идентична со стандардната заклучно со формирањето на метализационата мрежа, кога наместо гејт со вообичаените димензии се формира гејт чија ширина е помала од растојанието меѓу дифундираните n^+-подрачја. Потоа, низ маската што ја формираат дебелиот заштитен оксиден слој и алуминиумскиот гејт, се врши јонска имплантација на фосфор (односно бор, ако се работи за p-канален MOS-транзистор). Атомите на фосфорот, што располагаат со кинетичка енергија од околу 100 keV, навлегуваат во силициумот преку тенкиот оксиден слој и ги прошируваат n^+-слоевите до рабовите на алуминиумската лента. Со тоа фактички се остварува потребното совпаѓање на краевите на алуминиумскиот гејт со краевите на подрачјата на сорсот и дрејнот (сл.4.27-б). По завршувањето на имплантацијата, потребно е да се изврши загревање на плочката за да се намалат дефектите на кристалната решетка што настанале поради бомбардирањето. Температурата на загревањето мора да биде пониска од 600°C, за да не дојде до уништување на алуминиумскиот гејт.



Сл.4.27. Самоизрамнување со јонска имплантација:
а) пред имплантацијата
б) по имплантацијата

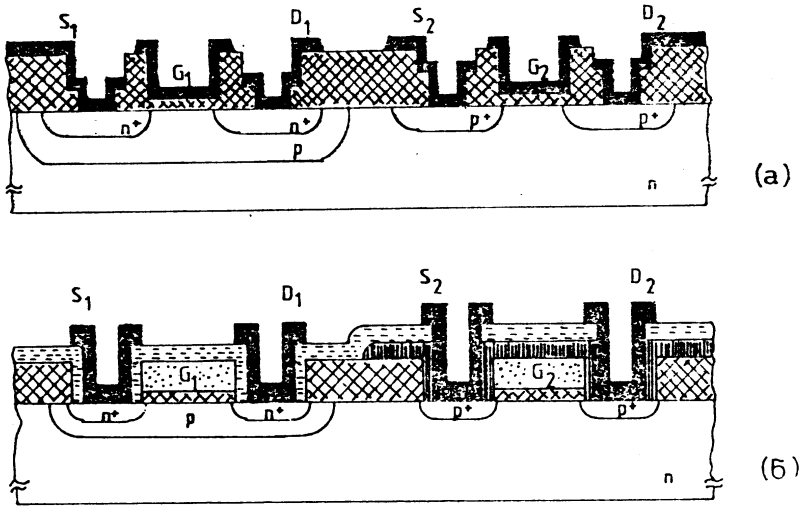
Преклопувањето на гејтот со подрачјата на дрејнот и сорсот овде е многу помало отколку кај транзисторите со силициумски гејт. Тоа е разбирливо ако се има предвид дека релативно ниските температури со кои е проследена јонската имплантација и релативно малата дебелина на имплантираниот слој (0,1 до 0,2 μm) не овозможуваат забележителна странична дифузија. Капацитивностите меѓу гејтот и сорсот и гејтот и дрејнот, C_{gs} и C_{gd}, се околу 40 пати помали отколку кај стандардниот транзистор со алуминиумски гејт што, со оглед на големото влијание на капацитивноста C_{gd} врз честотните својства, резултира во два до пет пати поголем фактор на широкопојасноста, односно во исто толку пати поголема брзина во работењето.

4.4.3. Структури со комплементарни MOS-транзистори [1-3]

Реализацијата на структури со комплементарни MOS-транзистори (CMOS-структури) всушност се сведува на реализација на n-канални и p-канални MOS-транзистори на заедничка подлога. Двата вида транзистори се со индуциран канал и со ист праговен напон. Најчесто се употребуваат изведби со алуминиумски гејт (сл.4.28-а), но забележителна примена имаат и изведбите со силициумски гејт(сл. 4.28-б). Исто така, со цел да се постигне ефектот на самоизрамнување, може да се применува и техниката на јонска имплантација. Како што е покажано на сликата 4.28, CMOS-структурите се формираат така што n-каналните транзистори се поставуваат во соодветна локална p-подлога, а p-каналните во општата n-подлога на склопот. Типичната длабочина на локалната p-подлога се движи од 7 до 10 μm. Даден чип може да има повеќе локални p-подлоги, но сите тие се меѓусебно галвански споени, така што ефективно претставуваат една единствена подлога.[1/] Потребната инверзна поларизација на pn-спојот меѓу локалната p-подлога и општата n-подлога, како и на pn-споевите меѓу дифундираните подрачја и соодветната подлога, се обезбедува на тој

1/ Во принцип е можно општата подлога да биде од p-тип, а локалната од n-тип, т.е. n-каналните транзистори да се формираат во општата, а p-каналните во локалната подлога. Ова, обично, не се практикува бидејќи за ист праговен напон n-каналните транзистори бараат подлога со поголема нето-примесна концентрација од p-каналните. Полесно е да се формира локална подлога со поголема нето-примесна концентрација од општата подлога отколку со помала.

начин што локалната p-подлога се спојува на негативниот пол на напојниот извор (се заземјува), а општата n-подлога на позитивниот.

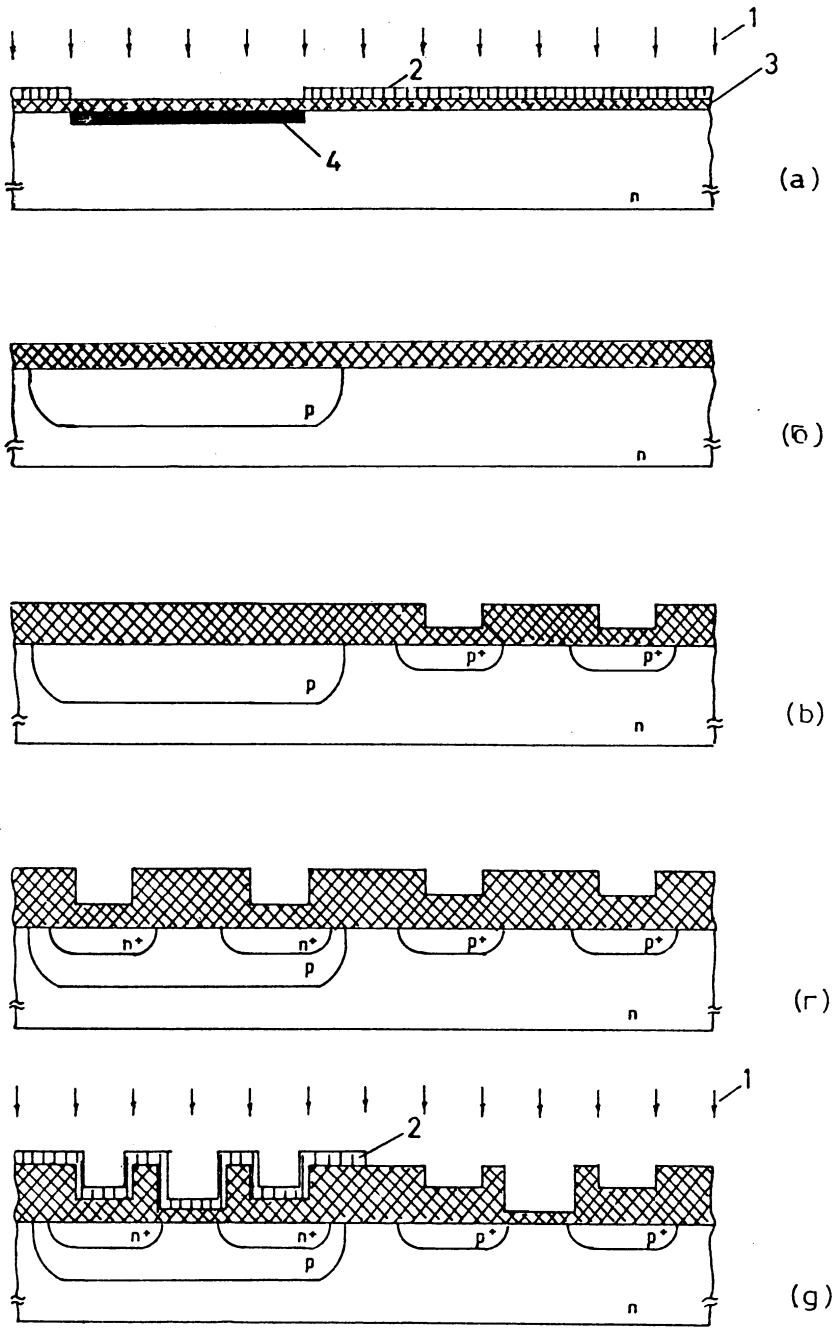


Сл.4.28. Комплементарни MOS-транизстори во заедничка подлога

а) со алуминиумски гејт
б) со силициумски гејт

Технолошкиот процес на изработка на CMOS-структури по својата комплексност се приближува кон технологијата на изработка на биполарните кола. Сепак, CMOS-структурите се јавуваат како перспективен развоен правец во MOS-интегралната технологија, благодарејќи на нивната поголема брзина на работа во споредба со PMOS- или NMOS-колата и на нивната извонредно мала потрошувачка на моќност при ниски работни честоти (типично 0,01 mW по порта при 1 kHz). Овие предности на CMOS-технологијата се резултат на шематиката на колата, т.е. на специфичната поврзаност на составните елементи (n-каналните и p-каналните транзистори), а не на некои измени односно подобрувања во структурата на елементите. CMOS-технологијата се карактеризира со помала густина на пакување од NMOS, односно PMOS-технологијата, што е разбирливо со оглед на нејзината поголема структурна сложеност.

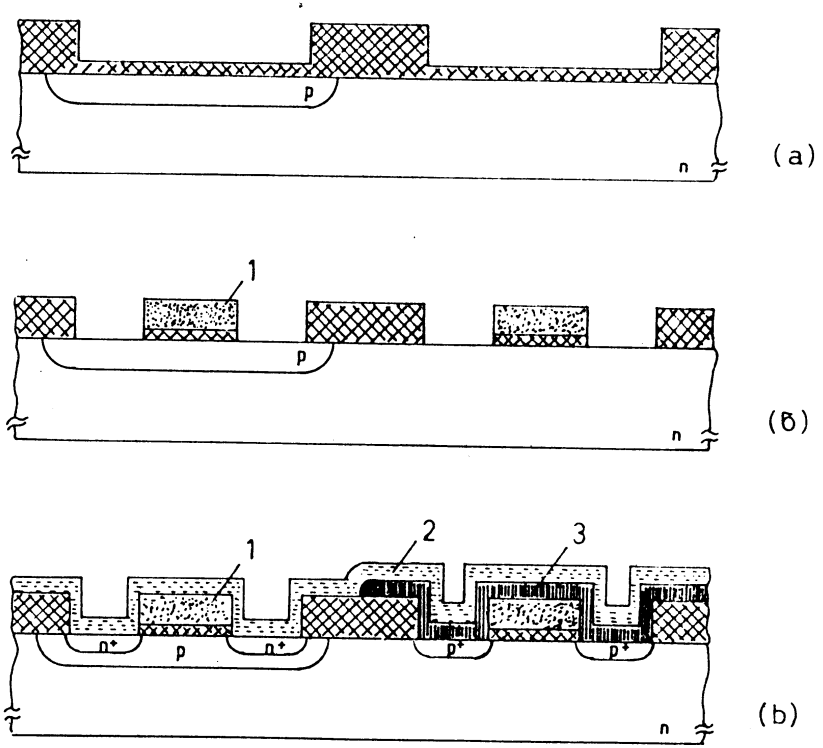
На сликата 4.29 се прикажани основните чекори на технолошката секвенца на изработка на CMOS-структури со алуминиумски гејт. Појдовен материјал е подлога од n-тип со кристална ориентација (100) и примесна концентрација од 10^{15} до $3x10^{15}cm^{-3}$. Врз подлогата се нараснува тенок оксиден слој со кој се заштитува површината на силициумот од инфилтрација на несакани примеси. По фотолитографски пат, врз оксидниот слој се создава фоторезистна маска со отвор на местото каде што треба да биде формирана локалната p-подлога, а потоа се врши предепозиција на бор низ тенкиот оксиден слој по пат на јонска имплантација (сл.4.29-а). Следува постапката на редистрибуција на имплантираниот слој во оксидациона атмосфера, со што се создава локалната p-подлога и истовремено се зголемува дебелината на заштитниот оксиден слој (сл. 4.29-б). При формирањето на локалната p-подлога, треба да се има предвид дека конечната вредност на нејзината површинска нето-примесна концентрација директно влијае врз вредноста на праговниот напон на n-каналните транзистори и дека праговниот напон на n-каналните транзистори се користи како референца за нагодување на праговниот напон на p-каналните транзистори. (Пред нагодувањето, праговниот напон на p-каналните транзистори е обично премногу негативен.) Вообичаените вредности на праговниот напон на n-каналните транзистори се движат од 0,5 до 1,0 V, а се постигнуваат при површинска концентрација од $5x10^{15}$ до $10^{16}cm^{-3}$. По создавањето на локалната p-подлога, во оксидниот слој се формираат отвори за дефинирање на дифузиите на сорсот и дрејнот на p-каналните транзистори, а потоа се врши двочекорна p^+-дифузија на бор. Редистрибуцијата се реализира во оксидациона атмосфера, со што дополнително се зголемува дебелината на оксидациониот слој (сл.4.29-в). Следен чекор е создавањето на подрачјата на сорсот и дрејнот на n-каналните транзистори во локалната p-подлога. Тоа се остварува со двочекорна n^+-дифузија на фосфор. И овој-пат редистрибуцијата се врши со оксидациона атмосфера (сл.4.29-г). Потоа се отстранува дебелиот оксиден слој од подрачјата на гејтовите и се врши термичко нараснување на тенок (околу 0,1 μm) оксиден слој кој ќе служи како оксид на гејтот.Со тоа структурата е подготвена за отворање на контактните отвори и за создавање на метализационата мрежа. Меѓутоа, пред извршувањето на овие завршни



Сл.4.29. Технолошка секвенца на изработка на CMOS-структури со алуминиумски гејт
1 - јони на бор; 2 - фоторезист; 3 - SiO_2;
4 - имплантирани атоми на бор

чекори, со кои се реализира структурата прикажана на сликата 4.28-а, неопходно е да се изврши нагодување на праговниот напон на p-каналните транзистори, што се остварува по пат на јонска имплантација на бор низ фоторезистна маска која ги заштитува каналите на n-каналните транзистори (сл.4.29-д).

На сликата 4.30 е илустриран дел од технолошката секвенца на изработка на CMOS-структури со силициумски гејт. Почетниот дел од овој процес, заклучно со формирањето локална p-подлога и заштитен оксиден слој (со дебелина од околу 1 μm), е ист како и кај претходно разгледуваниот процес. Следува отворање отвори во оксидниот слој на местата каде што треба да се формираат транзисторите проследено со формирање - по пат на



Сл.4.30. Формирање на комплементарни транзистори со силициумски гејт во заедничка подлога
1-полисилициумски гејт; 2-оксид легиран со фосфор; 3-оксид легиран со бор.

термичка оксицација - на тенок оксиден слој, со дебелина од околу 0,1 μm, кој всушност ќе служи како оксид на гејтот (сл. 4.30-а). Врз целата површина на плочката се нанесува слој од поликристален силициум со дебелина од 0,5 до 0,8 μm. По фотолитографски пат се дефинираат подрачјата на гејтовите, а потоа - со нагризување - се отстрануваат непотребните делови од поликристалниот силициум како и оние делови од тенкиот оксиден слој што остануваат непокриени со поликристален силициум (сл.4.30-б). Целата површина на плочката се прекрива со оксиден слој легиран со бор и се отстрануваат оние негови делови што се наоѓаат над n-каналните транзистори. Се врши повторно прекривање на плочката со оксиден слој, но овојпат легиран со фосфор. Следува загревање на плочката на температура од над 1000°C за примесите од легираните оксидни слоеви да дифундираат во силициумот и во поликристалните силициумски гејтови, формирајќи ги на тој начин подрачјата на сорсовите и дрејновите на двата вида транзистори и легирајќи ги силициумските гејтови(сл. 4.30-в). На крајот се отвораат контактни отвори над подрачјата на гејтовите, сорсовите и дрејновите и се формира металзационата мрежа (сл.4.28-б). За разлика од претходно разгледуваниот случај, овде не се предвидува корекција (намалување на негативната вредност) на праговниот напон на p-каналните MOS-транзистори, бидејќи силициумскиот гејт, при вообичаените нивоа на легираност на подлогата, овозможува да се добие бараната вредност на овој напон (обично се бара од -1,0 до -0,5 V) и без примена на јонска имплантација.

4.5. Основни елементи од топологијата на монолитните интегрални кола [1,3,6,8,20]

Карактеристиките на монолитните интегрални кола зависат не само од нивната вертикална структура, т.е. од примесните профили на интегралните елементи и особините на вградените диелектрички и проводнички филмови, туку исто така и од топологијата, т.е. од димензиите на елементите, од нивната заемна поставеност и од облиците и должините на спојните патеки.

Тополошкото оформување на колото обично е условено со следниве барања:

- максимизирање на густината на пакувањето преку минимизација на елементите, односно преку нивното соодветно распоредување и тополошко обликување,
- минимизирање на паразитните ефекти (на пример, ефектите на паразитните капацитивности, односно ефектите на топлинското дејство на дисипативните елементи),
- избегнување решенија кои значат непотребно тополошко или технолошко усложнување.

Во најкуси црти, тополошката разработка на монолитните интегрални кола ги вклучува долу наведените етапи.

1. Се црта електричната шема на колото, но така што нејзините изводи да се поклопуваат со положбата на соодветните контактни површини на идниот чип. (Положбите на контактните површини на чипот треба да се совпаѓаат со положбите на соодветните пинови на куќиштето.) Таму каде што е можно, се избегнуваат вкрстувањата.

2. Ако се работи за биполарно коло, се определува потребниот број изолациони острови. Тоа се врши по пат на групирање на елементите што можат да се постават во ист изолационен остров. Бројот на изолационите острови треба да биде што е можно помал, бидејќи со тоа обично се обезбедува поголема густина на пакувањето.

3. Се определува геометријата на елементите во зависност од потребните карактеристики.

4. Елементите се распоредуваат така што должините на меѓуелементните проводни патеки и бројот на вкрстувањата да бидат минимални. Освен тоа, треба да се настојува дисипираната моќност да биде што е можно порамномерно распределена по површината на чипот.

5. Се определуваат точните положби на контактните површини. Контактните површини треба да бидат поставени на периферијата на чипот.

6. Симетричноста на дадена електрична шема, како на пример на диференцијалниот засилувач, треба да биде зачувана и на чипот, т.е. елементите на симетричните делови од шемата треба да имаат иста геометрија. Освен тоа, овие елементи треба да бидат симетрично поставени во однос на изворите на топлина. Со тоа се постигнува идентичност на нивните карактеристики и компензација на температурните ефекти.

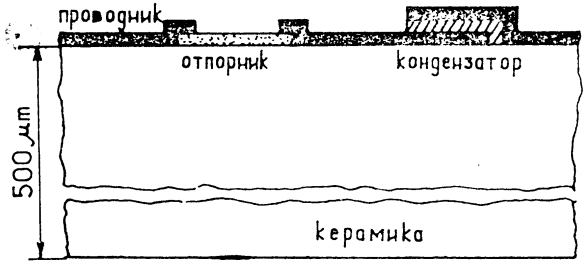
Типичните вредности на најкарактеристичните растојанија и димензии кај монолитните интегрални кола се:

- ширина на отворот за изолациона дифузија: 5 до 10 μm,
- растојание меѓу крајот на изолациониот остров и подрачјето на базната дифузија: 10 до 20 μm,
- минимална ширина на отворите за дифузија: 5 μm,
- минимални димензии на контактните отвори: 5x5 μm^2,
- минимални димензии на контактните површини: 50x50 μm^2,
- минимално растојание од крајот на чипот до контактна површина или до дифузно подрачје: 50 μm,
- ширина на проводните патеки: 5 до 10 μm,
- растојание меѓу две соседни проводни патеки: 5 до 15 μm.

5. ХИБРИДНИ ИНТЕГРАЛНИ КОЛА

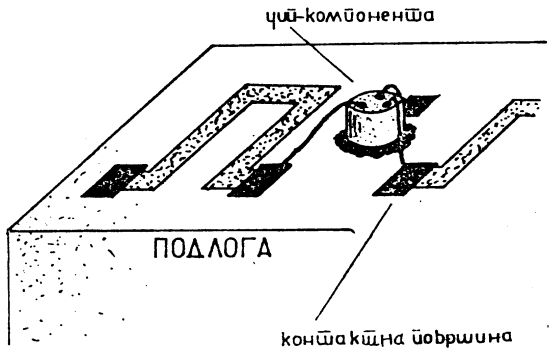
5.1. Класификација и карактеристики на хибридните интегрални кола [1-3,9]

Како резултат на напорите кон минијатуризација на електронските склопови, развиени се - паралелно со монолитните - и друг вид интегрални кола познати како хибридни интегрални кола. Овие микроелектронски склопови се комбинација од различни техники и технологии, при што како основен составен дел кај нив се јавува т.н. слојно коло. Слојното коло се состои од пасивни елементи (главно: проводнички патеки, отпорници и кондензатори), формирани врз заедничка диелектричка подлога по пат на нанесување филмови од различни материјали (сл.5.1). Во зависност од дебелината на филмовите, која е тесно поврзана со составот на материјалите и начинот на нанесувањето, слојните кола се делат на дебелослојни и тенкослојни, па во врска со тоа разликуваме и два типа хибридни интегрални кола - дебелослојни и тенкослојни хибридни интегрални кола. Другите компоненти потребни за формирање на хибридните интегрални кола (најчесто активни, но и пасивни) се приклучуваат кон слојното коло преку соодветни



Сл.5.1. Напречен пресек на слојно коло

контактни површини изготвени за таа цел на подлогата (сл.5.2). Овие компоненти обично се без куќиште и се познати како чип-компоненти.



Сл.5.2. Структура на хибридно интегрално коло

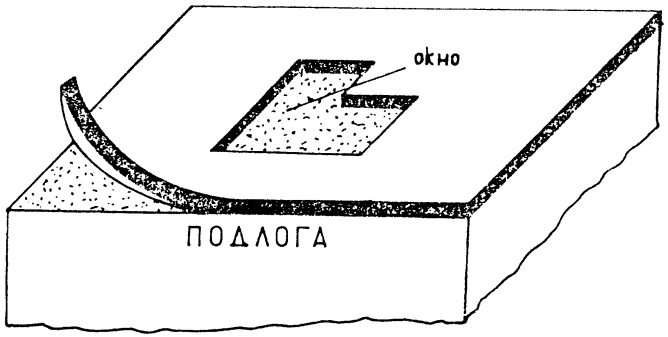
Густината на пакување кај хибридните интегрални кола е помала отколку кај монолитните. Освен тоа, хибридните интегрални кола заостануваат зад монолитните и во поглед на надежноста. Меѓутоа, кога се работи за процесирање на големи напони и моќности, хибридните интегрални кола се во предност во споредба со монолитните. Нивната предност се протега и на честотниот дострел, температурната стабилност и прецизноста на реализацијата на одредени електрични функции. Развојниот процес кај хибридните интегрални кола е многу поедноставен и поевтин отколку кај монолитните интегрални кола. Според тоа, во голем број случаи, хибридните интегрални кола можат да бидат посоодветни или поприфатливи отколку монолитните.

5.2. Слојни кола - основни принципи на нанесување на филмовите и карактеристики [1-3,9]

Според начинот на изработката и особините, разликуваме два типа слојни кола - дебелослојни и тенкослојни.

Технолошкиот процес со кој се реализираат дебелослојните кола во суштина се состои во нанесување - според методот на ситопечат - на проводнички, отпорнички и диелектрички материјали во форма на пасти врз керамичка подлога и во последователна термичка обработка на така нанесените слоеви. Со проводничките пасти се остваруваат спојните, односно напојните патеки, електродите

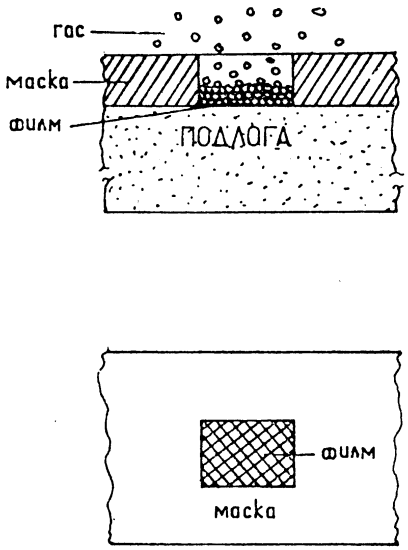
на кондензаторите, контактните површини за чип-компонентите и периферните контактни површини на колото. Отпорничките пасти служат за реализација на отпорниците. Со диелектричките пасти се остваруваат кондензаторските изолатори и се формира општата заштита на површината на готовото дебелослојно коло. Секој поставен слој (филм) треба да има своја конфигурација, своја шара. Тоа се постигнува на тој начин што пастите се нанесуваат преку соодветни флексибилни контактни маски (сл.5.3). Плоштината на подлогата кај дебелослојните кола обично се движи од 3,5 до 35 cm^2, а дебелината од 0,5 до 1 mm. Процесирањето е поединечно (коло по коло).



Сл.5.3. Флексибилна контактна маска

Технологијата на изготвување на тенкослојните кола е посложена отколку кај дебелослојните. Освен тоа, таа бара специјална опрема која обично е многу поскапа од опремата потребна за реализација на дебелослојните кола. Подлогата е најчесто од керамика или стакло, со димензии од 10x12 mm^2 до 30x40 mm^2 и дебелина од 0,5 до 1 mm. Процесирањето обично е групно, т.е. истовремено се изработуваат повеќе идентични кола - но на одвоени подлоги. Кај класичната тенкослојна технологија, филмовите се нанесуваат по пат на таложење од гасна фаза. Притоа, значаен момент е тоа што тие не ја добиваат својата конечна дебелина одеднаш, каков што е случајот со дебелослојните кола, туку постепено - еден по еден

мономолекуларен слој (сл.5.4). И овде за формирање на елементите се користат проводнички, отпорнички и диелектрички материјали што се нанесуваат еден врз друг во вид на филмови со соодветна шара. За формирањето на тенкослојните елементи се користат две принципиелно различни постапки кои се познати како постапка на селективна депозиција и суптрактивна постапка. Во постапката на селективна депозиција бараната шара се остварува на тој начин што филмовите се нанесуваат на подлогата преку соодветни маски (обично метални). Сосема поинаку се постапува во случајот на суптрактивната постапка, каде што филмовите се нанесуваат униформно, по целата површина на подлогата, а бараната шара се реализира по фотолитографски пат.



Сл.5.4. Нанесување на еден по еден мономолекуларен слој

Врз основа на погоре изложеното, веднаш можат да се извлечат одредени заклучоци во врска со основните карактеристики на слојните кола. Техниката на ситопечат, што се применува за поставување на филмовите во дебелослојната техника, не дозволува ширината на проводните патеки да биде помала од 200 μm. Истото тоа важи и за растојанијата меѓу соседните елементи. Затоа, за да се избегне појавата на несакани прекини на проводните патеки, односно на споеви меѓу соседните елементи, како типична вредност за ширината на проводните патеки, односно за растојанијата меѓу соседните елементи во дебелослојната техника се зема вредноста од 500 μm. Во случајот на тенкослојната техника, дефинирањето на границите на филмовите е многу попрецизно, па тука типичните вредности на ширината на проводните патеки и растојанијата меѓу соседните елементи изнесуваат 100 μm. Според тоа, можната густина на пакување на елементите кај тенкослојните кола е значител-

но поголема отколку кај дебелослојните кола. Механичкиот начин на нанесување на филмовите кај дебелослојните кола не овозможува добивање на слоеви со дебелина помала од 10 μm. Во практиката, за да се обезбедат задоволителни толеранции во дебелината, како типична дебелина на слоевите се јавува вредноста од 25 μm. Кај тенкослојната техника е можна строга контрола на дебелината на филмот бидејќи, како што веќе рековме, бараната дебелина се постигнува постепено - со нараснување на еден по еден мономолекуларен слој. Тоа овозможува постигнување задоволителни толеранции во дебелината на филмот и при многу потенки филмови отколку кај дебелослојната техника. Затоа, дебелината на филмовите кај тенкослојната техника обично не ја надминува вредноста од 1 μm. Работењето со подебели филмови би довело до неоправдано поскапување на производот . Имено, брзината на нараснување на филмовите во тенкослојната техника е релативно мала, па постапката би траела многу долго. Освен тоа, ако дебелината на филмовите е поголема од 1 до 2 μm, постои опасност од нивно меѓусебно одлепување, односно од лупење од подлогата. Со оглед на малата дебелина на филмовите, тенкослојната техника поставува многу построги барања во однос на чистотата на нанесуваниот материјал и глаткоста на подлогата отколку што е случајот со дебелослојната техника. Особено осетливи во овој поглед се тенкослојните кондензатори.

Дебелослојните кола поднесуваат поголеми моќности и поголеми напони отколку тенкослојните - што е главно резултат на поголемите димензии на елементите и поголемите растојанија меѓу нив. Од друга страна, тенкослојната техника се одликува со поголем честотен дострел. Тоа е резултат на поквалитетната изведба на нејзините елементи, и пократките спојни патеки меѓу нив. Толеранциите на параметрите кај тенкослојните кола се помали отколку кај дебелослојните. Меѓутоа, и кај дебелостојните кола се постигнуваат извонредно добри резултати во поглед на толеранциите доколку се применува постапката на уточнување на елементите. Тенкослојната техника е поперспективна од дебелослојната во поглед на асортиманот и квалитетот на елементите. Но, од друга страна, кога се работи за малосериско производство, дебелослојните кола се поприфатливи од тенкослојните, со оглед на значително пониската цена на производната опрема и значително пониските развојни и производни трошоци.

Постапката на уточнување на елементите,за која ќе зборуваме подоцна, претставува всушност корекција на вредностите на отпорниците и кондензаторите по изработката на слојното коло и се применува како кај дебелослојната така и кај тенкослојната техника. Можноста за извршување корекција на вредностите на пасивните елементи е една од предностите на хибридните интегрални кола во однос на монолитната техника.

5.3. Елементи на слојните кола [1-9,11,23]

Како што беше изнесено во 5.1, во слојната техника се изработуваат главно пасивни елементи, и тоа пред сè проводни патеки, отпорници и кондензатори. Навистина, тенкослојната техника дава можности за реализација и на некои активни елементи (тенкослојни диоди и транзистори) [1] , меѓутоа тие можности ретко се користат поради релативно слабиот квалитет на овие елементи и поради сложеноста на постапките на нивното добивање. Можат да се изработуваат и индуктивни елементи,како во тенкослојната така и во дебелослојната техника [2],[9][21]. Меѓутоа, таквата изработка обично не е економски и технички оправдана (освен ако се работи за примени во гигахерцното подрачје).Имено, слојните индуктивни елементи се карактеризираат со мала специфична индуктивност (10 до 20 nH/mm^2) и релативно низок Q-фактор.

Овде ќе бидат разгледани само проводните патеки, слојните отпорници и слојните кондензатори. Овие елементи се реализираат и во дебелослојната и во тенкослојната технологија. Конфигурациите на дебелослојните и тенкослојните елементи се исти или слични, но нивните конкретни димензии (при зададени електрични параметри) можат суштествено да се разликуваат.

5.3.1. Проводни патеки

Проводните патеки се елементи со кои се обезбедуваат врските меѓу другите елементи во интегралното коло (отпорниците,

кондензаторите итн.). Се реализираат од материјали кои се одликуваат со голема специфична проводност и добра атхезија кон подлогата и кои овозможуваат воспоставување добри споеви со изводите на чип-компонентите.

Основен параметар на проводните патеки е слојната отпорност R_s. Други важни параметри се ширината W и дебелината d. Во табелата 5.1. се дадени подрачјата на типичните вредности на овие параметри. Величината b претставува растојание меѓу две соседни проводни патеки. Ширината на патеките зависи од можностите на технологијата, слојната отпорност и јачината на струјата.

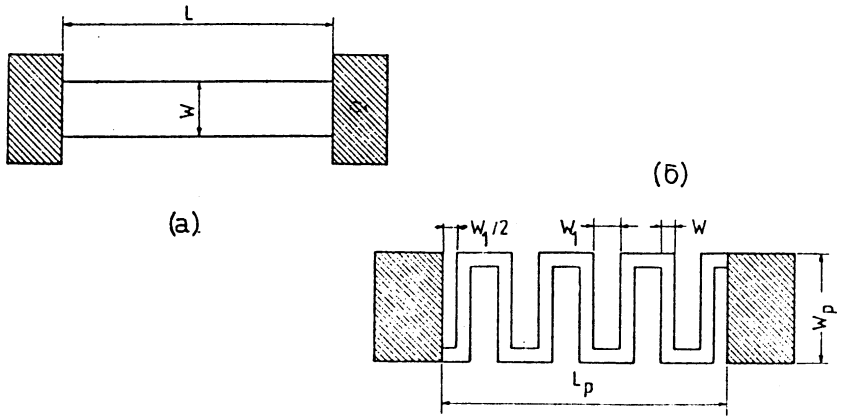
Табела 5.1. Параметри на слојните патеки

Тип на патеката	R_s, Ω/□	d, μm	W, μm	b, μm
дебелослојна	0,05÷5,00	10÷25	150÷1000	50÷750
тенкослојна	0,01÷0,10	0,1÷1,0	50÷250	50÷250

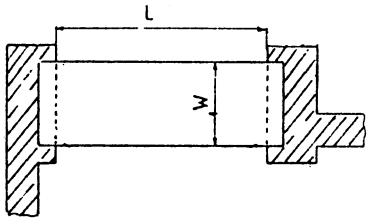
Патеките наменети за напојување и заземјување на електронските елементи обично се пошироки од другите патеки.

5.3.2. Слојни отпорници

Слојните отпорници се најмногу употребуваните елементи во хибридните интегрални кола. Така, на пример, во аналогните хибридни кола на една полупроводничка чип-компонента доаѓаат во просек 7 до 8 отпорници. Отпорниците се нанесуваат на диелектричката подлога во вид на тесни ленти од отпорнички материјал, кои завршуваат со високопроводни површини. Тенкослојните отпорници најчесто се изработуваат во облик на правоаголници (линиски отпорници) или, кога се потребни поголеми отпорности, во облик на меандри (меандрообразни отпорници) (сл.5.5.). Дебелослојните отпорници се реализираат, по правило, како линиски (сл.5.6). Во тенкослојната техника, обично, краевите на отпорникот се наоѓаат под високопроводните површини, додека во дебелослојната техника - над високопроводните површини.



Сл.5.5. Тенкослојни отпорници
а) линиски отпорник
б) меандрообразен отпорник



Сл.5.6. Стандарден облик на дебелослојните отпорници

Параметри на слојните отпорници [8,21] Основни параметри на слојните отпорници се:

- номиналната вредност на отпорноста R(Ω),
- факторот на дозволеното отстапување од номиналната вредност $\gamma_R=\gamma\{\Delta R/R\}$ (%),
- максималната дозволена дисипација P_{max}(W),
- температурниот коефициент на отпорноста $TCR=dR/RdT(K^{-1})$,

- слојната отпорност R_s ($\Omega/\square$),
- максималната дозволена густина на дисипацијата Q_{max} (W/cm^2).

Други важни параметри се димензиите на отпорникот (на пример, кај линискиот отпорник - ширината W и должината L) и коефициентот на стареењето K_R, кој е дефиниран како процентуална промена на отпорноста за одреден временски период Δt, при одредена температура ($K_R=(|\Delta R|/R)/\Delta t$).

Во табелата 5.2. се назначени подрачјата на типичните вредности на параметрите кај дебелослојните и тенкослојните отпорници. При тоа, за факторот на дозволеното отстапување од номиналната вредност γ_R се дадени по две подрачја: подрачје за случајот кога не се врши уточнување и подрачје за случајот кога се

Табела 5.2. Типични параметри на слојните отпорници

Тип на отпорникот	R_s, $\Omega/\square$	R, Ω	γ_R, %	TCR, K^{-1}	Q_{max}, W/cm^2
дебелослоен	1 до 10^7	0,5 до 5×10^8	10 до 20 (0,1 до 2)	-250×10^{-6} до 250×10^{-6}	4 до 10
тенкослоен	5 до 500	10 до 10^6	5 до 10 (0,05 до 1)	-100×10^{-6} до 100×10^{-6}	1 до 2

врши уточнување (вредностите во заградите). Врз основа на табелата можат да се извлечат следниве заклучоци:

- дијапазонот на отпорностите кај слојните отпорници е многу поширок отколку кај монолитните отпорници,
- слојната техника обезбедува отпорници со поголема прецизност и температурна стабилност отколку монолитната техника,
- во поглед на дијапазонот на отпорностите и максималната дозволена густина на дисипацијата во предност е дебелослојната техника, а во поглед на прецизноста и температурната стабилност во предност е тенкослојната техника.

Како и кај монолитната техника, односот R_1/R_2 од два неуточнети отпорника, изведени на иста подлога, се карактеризира со многу помало расејување и помал температурен коефициент отколку одделните отпорници. Слојните отпорници покажуваат голема временска стабилност. Така, на пример, типичната релативна промена на отпорноста за време од 1000 часа при темепратура од 70^oC кај дебелослојните отпорници изнесува 0,05%, а кај тенкослојните - 0,005%.

Освен од температурата, отпорноста кај дебелослојните отпорници зависи и од приклучениот (прав) напон. Како квантитативен показател на таа зависност се користи напонскиот коефициент на отпорноста, кој е дефиниран со изразот:

$$VCR = \frac{1}{R}\frac{dR}{dV}$$

Напонскиот коефициент на отпорноста кај добрите дебелослојни отпорници е помал од 50×10^{-6} V^{-1}.

Номиналната вредност на слојниот отпорник е дадена со изразот:

$$R = R_s \frac{L_m}{W} \qquad (5.3.1)$$

каде што L_m е должината на средната линија, а W ширината на отпорничката лента. Кај линиските отпорници е $L_m=L$, а кај меандрообразните важи:

$$L_m = L_p+n(W_p-W) \qquad (5.3.2)$$

каде што значењата на L_p и W_p се дадени на сликата 5.5-б, а n е еднаков на бројот на Z-образните елементи (меандрите).

При попрецизно одредување на отпорноста, треба да се земат предвид и отпорностите на контактите на отпорничката лента со високорповодните површини. Освен тоа, треба да се изврши и корекција на изразот (5.3.1) бидејќи ефективната отпорност на квадратите во аглите на меандрообразниот отпорник не е еднаква на R_s, како што се претпоставува во (5.3.1), туку е еднаква на 0,56 R_s. Имајќи предвид дека секој меандер има по два аголни квадрата, лесно се заклучува дека поточниот облик на (5.3.1) ќе гласи:

$$R = R_s \left(\frac{L_m}{W} - 2x0,44xn\right) \qquad (5.3.3)$$

Максималната дозволена дисипација на слојниот отпорник е дадена со изразот:

$$P_{max} = SQ_{max} = L_m W Q_{max}$$

каде што S е плоштината на отпорничката лента.

Проектирање отпорници со правоаголна форма [3,7,20-22] Проектирањето отпорници со правоаголна форма, при зададена слојна отпорност R_s и дисипација P, се сведува на определување на нивната должина L и ширината W. Притоа е неопходно густината на дисипацијата на проектираниот отпорник (за зададената моќност P) да биде помала од максимално дозволената Q_{max}, а вредноста на отпорникот по неговата реализација да биде во рамките на декларираните толеранции.

Согласно со (5.3.1), димензиите на отпорникот L и W мораат да бидат такви што да го задоволуваат изразот:

$$R = R_s \frac{L}{W} \qquad (5.3.4)$$

Од друга страна, за да се обезбеди помала дисипација по единица плоштина од максимално дозволената, мора да важи:

$$Q_{max} LW \geq P \qquad (5.3.5)$$

што, со оглед на (5.3.4), ќе биде задоволено ако е:

$$W \geq \left(\frac{R_s P}{RQ_{max}}\right)^{1/2} \equiv W_p \qquad (5.3.6)$$

Отпорноста на реализираниот отпорник ќе се разликува од неговата номинална вредност. Разликата ќе се појави поради отстапувањата на неговите димензии и слојната отпорност од предвидените вредности. Имено, како резултат на грешките во употребените маски и фотошаблони ќе се јават грешки ΔL и ΔW во димензиите, а како резултат на неточноста во дебелината на нанесениот слој ќе се јави гршка ΔR_s во слојната отпорност. Релативното отстапување на отпорноста од номиналната вредност ќе биде дадено со изразот:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta R_s}{R_s} + \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta W}{W} \qquad (5.3.7)$$

кој важи за релативно мали грешки ΔR_s, ΔL и ΔW, а се добива со логаритмирање и диференцирање на двете страни од изразот (5.3.4). Со оглед на тоа што прирастите ΔR_s, ΔL и ΔW во принцип можат да бидат и позитивни и негативни, апсолутната вредност на релативната грешка на отпорноста ќе го задоволува изразот:

$$\left|\frac{\Delta R}{R}\right| \leq \left|\frac{\Delta R_s}{R_s}\right| + \left|\frac{\Delta L}{L}\right| + \left|\frac{\Delta W}{W}\right| \qquad (5.3.8)$$

Ако со δ_{R_s} се означи максималната можна релативна грешка во слојната отпорност, т.е.

$$\delta_{R_s} = \left|\frac{\Delta R_s}{R_s}\right|_{max} \qquad (5.3.9)$$

а со a_L и a_W максималните можни вредности на отстапувањата $|\Delta L|$ и $|\Delta W|$, т.е.

$$a_L = |\Delta L|_{max} \qquad (5.3.10)$$

$$a_W = |\Delta W|_{max} \qquad (5.3.11)$$

(величините δ_{R_s}, a_L и a_W се карактеристики на конкретната технологија; обично се израмнуваат со трикратните стандардни девијации на соодветните случајни варијабли $\Delta R_s/R_s$, ΔL и ΔW), согласно со (5.3.8), ќе важи:

$$\left|\frac{\Delta R}{R}\right| \leq \delta_{R_s} + \frac{a_L}{L} + \frac{a_W}{W} \qquad (5.3.12)$$

При проектирањето на отпорникот, димензиите L и W треба да се одредат така што десната страна од (5.3.12) да биде помала од факторот на дозволеното отстапување γ_R. Тоа, согласно со (5.3.12), гарантира дека и релативната грешка на реализираната отпорност ќе биде исто така помала од факторот на дозволеното отстапување од номиналната вредност γ_R. Значи, треба да биде исполнет условот:

$$\delta_{R_s} + \frac{a_L}{L} + \frac{a_W}{W} \leq \gamma_R \qquad (5.3.13)$$

Се разбира, условот (5.3.13) може да биде задоволен само ако е $\gamma_R > \delta_{R_S}$ - па следува дека факторот на дозволеното отстапување од номиналната вредност γ_R за дадена технологија не може да биде помал од максималната можна релативна грешка на слојната отпорност во таа технологија. Со оглед на тоа што, согласно со изразот (5.3.4), односот L/W е фиксиран со изборот на слојната отпорност, т.е. $L/W=R/R_S$, условот (5.3.13) ќе биде исполнет ако е:

$$W \geq \frac{a_W + a_L \frac{R_S}{R}}{\gamma_R - \delta_{R_S}} \equiv W_\Delta \qquad (5.3.14)$$

Освен условите (5.3.6) и (5.3.14), проектираната ширина W мора да задоволува уште еден услов, имено таа треба да биде поголема од пропишаната минимална ширина W_T за применуваната технологија, т.е.

$$W \geq W_T \qquad (5.3.15)$$

Според тоа, проектирањето на отпорникот се состои во усвојување ширина W која го задоволува изразот:

$$W \geq \max\{W_p, W_\Delta, W_T\} \qquad (5.3.16)$$

и во одредување на должината L според релацијата (5.3.4).

Горното важи доколку е $R/R_S > 1$. Во спротивен случај, прво се усвојува должината L според релацијата:

$$L \geq \max\{L_p, L_\Delta, L_T\}, \qquad (5.3.17)$$

а потоа се одредува ширината W, согласно со изразот (5.3.4). Во релацијата (5.3.17), L_p и L_Δ се дадени со изразите:

$$L_p = \left(\frac{R\,P}{R_S\,Q_{max}}\right)^{1/2} \qquad (5.3.18)$$

$$L_\Delta = \frac{\frac{R}{R_S}\,a_W + a_L}{\gamma_R - \delta_{R_S}}\,, \qquad (5.3.19)$$

а L_T е пропишаната минимална должина за дадената технологија[1/].

Кај тенкослојната техника најмалите пропишани димензии се $W_T=L_T=0{,}05$ mm ако филмовите се нанесуваат според суптрактивната постапка, односно $W_T=L_T=0{,}10$ до $0{,}20$ mm ако нанесувањето на филмовите се врши според постапката на селективна депозиција.

Кај дебелослојната техника најмалите пропишани димензии се $W_T=L_T=1{,}250$ mm. При дозволено отстапување од номиналната вредност од 20% или поголемо, вредностите W_Δ и L_Δ се редовно помали од 1,250 mm, па во таков случај изразите (5.3.16) и (5.3.17) се сведуваат на:

$$W \geq \max\{W_p;\ 1{,}250\ \text{mm}\} \qquad (5.3.20)$$

$$L \geq \max\{L_p;\ 1{,}250\ \text{mm}\} \qquad (5.3.21)$$

Проблематиката на проектирање меандрообразни отпорници и отпорници со други форми е детално обработена во специјалистичката литература [20]-[22].

Пример 5.1.

Проектирај тенкослоен отпорник со отпорност R=5 kΩ, моќност P=25 mW и фактор на дозволеното отстапување од номиналната вредност $\gamma_R=10\%$. Отпорникот треба да биде реализиран од материјал чија слојна отпорност е $R_S=500\ \Omega/\square$. Дозволената дисипација по единица плоштина изнесува $Q_{max}=2W/cm^2$. Технолошките грешки се $\delta_{R_S}=3\%$, $a_L=a_W=0{,}01$ mm, а најмалите пропишани димензии изнесуваат $W_T=L_T=0{,}10$ mm.

Решение

Наоѓаме:

$$W_p = \left(\frac{R_S P}{R\,Q_{max}}\right)^{1/2} = \left(\frac{500\times25\times10^{-3}}{5000\times2\times10^{-2}}\right)^{1/2} \doteq 0{,}354\ \text{mm}$$

$$W_\Delta = \frac{a_W + a_L\frac{R_S}{R}}{\gamma_R - \delta_{R_S}} = \frac{0{,}01+0{,}01\times0{,}1}{0{,}1-0{,}03} \doteq 0.157\ \text{mm}$$

1/ Всушност, димензиите L и W треба да бидат такви што истовремено да бидат задоволени релациите (5.3.4), (5.3.16) и (5.3.17).

Значи,

$$W \geq \max\{W_p, W_\Delta, W_T\} = \max\{0,354;\ 0,157;\ 0,100\} = 0,354 \text{ mm}$$

Усвојуваме:

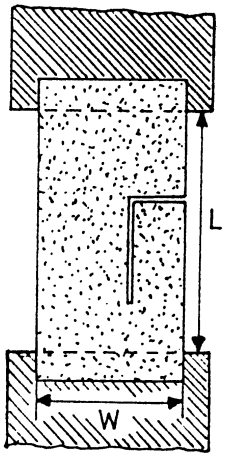
$$W = 0,400 \text{ mm}$$

и наоѓаме:

$$L = W \frac{R}{R_s} = 0,400 \times 10 = 4 \text{ mm//}$$

Уточнување на слојните отпорници Една од предностите на слојните отпорници во однос на монолитните отпорници е можноста на коригирање на нивната вредност по реализацијата на колото. Уточнувањето најчесто се врши по пат на отстранување на дел од материјалот на отпорничката лента со помош на ласерски зрак. Дијаметарот на пресекот на зракот е обично помал од 50 μm. Бидејќи со отстранувањето материјал отпорноста на отпорничката лента може само да се зголеми, отпорниците предвидени за уточнување се проектираат така што нивната отпорност пред уточнувањето да биде помала од отпорноста што се предвидува да се постигне по уточнувањето.

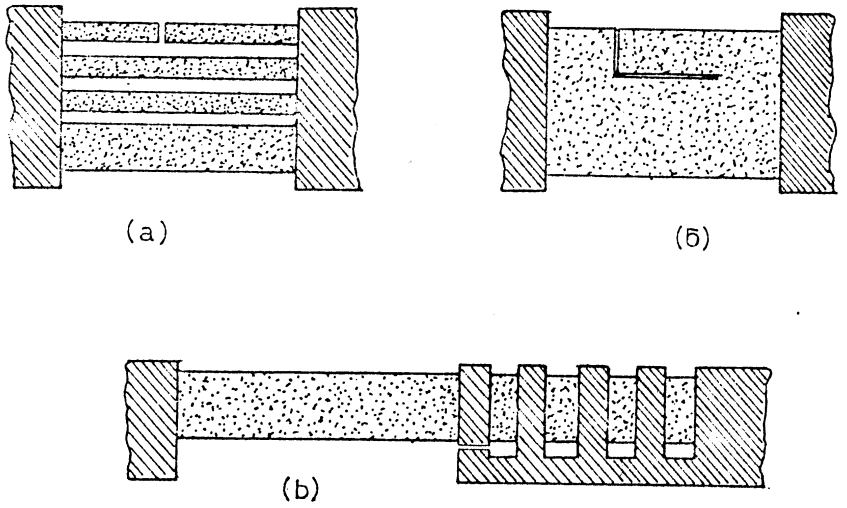
За уточнување на линиските дебелослојни отпорници обично се користи т.н. L-образен рез (сл.5.7). Најнапред се врши напречно режење сè додека отпорноста на отпорникот не стане само за 2% помала од номиналната, а потоа се сече надолжно сè додека не се постигне саканата точност.



Сл.5.7. L-образен рез

За уточнување на тенкослојните отпорници, освен L-образниот рез, се користат и други постапки. Некои од нив се прикажани на сликата 5.8. Во случајот на сликата 5.8-а, отпорноста степенесто се зголемува со отстранување на дел од отпорничкиот материјал. Во случајот на сликата 5.8-в, отпорноста степенесто се зголемува со отстранување на дел од материјалот на високопроводната површина.

Проблематиката на проектирањето отпорници предвидени за уточнување е детално разработена во специјалистичката литература [20]-[22].



Сл.5.8. Уточнување отпорници кај тенкослојните кола

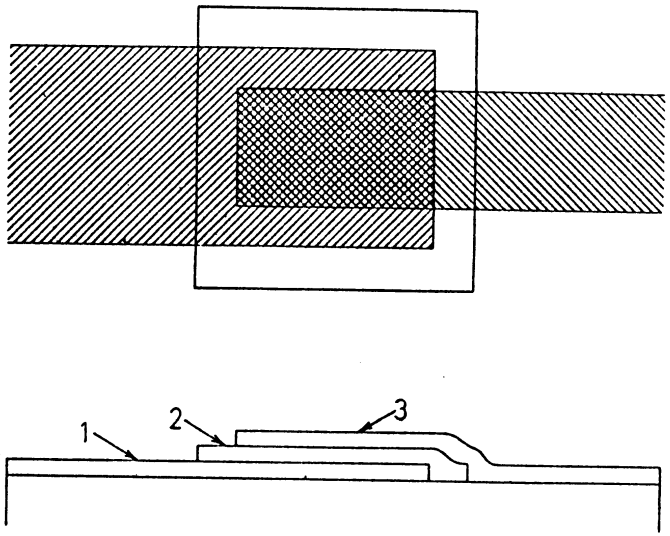
5.3.3. Слојни кондензатори

Структурата и конфигурацијата на типичниот слоен кондензатор е прикажана на сликата 5.9. Како што се гледа, тој се изведува во вид на трислојна структура: високопроводен слој—диелектрик—високопроводен слој. Капацитивноста на ваквиот кондензатор е право пропорционална со преклопната плоштина на електродите и со диелектричката константа на диелектрикот, а обратно пропорционална со растојанието меѓу електродите. Според тоа, за да се добие што е можно поголема капацитивност при зададена преклопна плоштина, неопходно е да се употреби диелектрички слој со голема диелектричка константа и со што е можно помала дебелина. Кај тенкослојните кондензатори минималната дебелина на диелектричкиот слој е ограничена со работниот напон и обично не е помала од 0,1 μm. Кај дебелослојните кондензатори, согласно со начинот на нанесување на филмовите, слободата за манипулирање со дебелината

на диелектричкиот филм е ограничена и како типична дебелина се јавува дебелината од 25 μm. Затоа, специфичната капацитивност кај дебелослојните кондензатори обично е помала отколку кај тенкослојните; иако разликите во дебелината во голема мера можат да се компензираат преку примена на пасти со голема диелектричка константа.

Основни параметри на слојните кондензатори се:

- номиналната вредност на капацитивноста C (F),
- факторот на дозволеното отстапување од номиналната вредност $\gamma_C=\gamma\{\Delta C/C\}$ (%),
- максималниот дозволен напон V_{max} (V)
- температурниот коефициент на капацитивноста $TCC=dC/CdT$ (K^{-1})
- специфичната капацитивност C_o (pF/cm^2),
- факторот на загубите $tg\delta$



Сл.5.9. Слоен кондензатор

1-долна електрода; 2-диелектрик; 3-горна електрода

Исто така значајни параметри се плоштината на преклопната површина S, дебелината на диелектрикот d, одводната отпорност R_L и коефициентот на старењето $K_C=(|\Delta C|/C)/\Delta t$.

Во табелите 5.3 и 5.4 се прикажани подрачјата на типичните вредности на некои параметри кај дебелослојните и тенкослојните кондензатори. Вредностите на факторот на дозволеното отстапување од номиналната вредност γ_C се дадени за два случаја: за случајот кога не се врши уточнување и за случајот кога се врши уточнување (вредностите во заградите).

Табела 5.3. Типични параметри на дебелослојните кондензатори

C_o, pF/cm^2	C, pF	γ_C, %	TCC, K^{-1}	V_{max}, V
10^3 до $30x10^3$	20 до $30x10^3$	15 до 20 (1 до 3)	$-1000x10^{-6}$ до $1000x10^{-6}$	>100

Табела 5.4. Типични параметри на тенкослојните кондензатори

Тип на диелектрикот	C_o, pF/cm^2	C, pF	γ_C, %	TCC, K^{-1}	V_{max}, V
SiO	$5x10^3$ до 10^4	10 до 1000	10 до 15 (1 до 3)	$200x10^{-6}$	30 до 60
Ta_2O_5	$6x10^4$ до $2x10^5$	$5x10^2$ до 10^5	10 до 15 (1 до 3)	$400x10^{-6}$	3 до 15

Одводната отпорност R_L кај слојните кондензатори е обично поголема од $10^{10}\Omega$. Коефициентот на стареењето K_C кај слојните кондензатори е определен главно со деградационите појави во диелектрикот и најчесто се движи од 1 до 5% на 1000 часа. Тоа значи дека тој е значително поголем отколку соодветниот коефициент (K_R) кај слојните отпорници.

Капацитивноста на слојните кондензатори се пресметува според познатата релација:

$$C = \varepsilon_r \varepsilon_o \frac{S}{d} \qquad (5.3.22)$$

Слојните кондензатори, меѓутоа, значително отстапуваат од идеалните капацитивни елементи. Установено е дека во прва апроксимација нивната импеданција може да се прикаже во обликот:

$$Z = -jX_C + X_R = -\frac{j}{\omega C} + \frac{tg\delta'}{\omega C} + R' \qquad (5.3.23)$$

Овде C е дадено со (5.3.22), факторот $tg\delta'$ зависи од употребениот диелектрик и е познат како фактор на диелектричките загуби, а R' е еквивалентната отпорност на електродите и сериски споените проводни патеки. Според тоа, факторот на загубите на слојните кондензатори ќе биде даден со изразот:

$$tg\delta = \frac{X_R}{X_C} = tg\delta' + \omega CR' \qquad (5.3.24)$$

При ниски и средни честоти (обично до неколку стотини килохерци) првиот член е доминантен, па е:

$$tg\delta = tg\delta' \qquad (5.3.25)$$

т.е. факторот на загубите на кондензаторот е приближно еднаков на факторот на загубите на неговиот диелектрик. При повисоки честоти, меѓутоа, вториот член станува значаен и тој го одредува честотниот дострел на кондензаторот. Затоа, во склоповите наменети за работа при високи честоти кондензаторските електроди се изведуваат со што е можно помала слојна отпорност R_S (обично е $R_S < 0{,}01\ \Omega/\square$). Кај тенкослојните кондензатори факторот за загубите при ниски честоти се движи од 0,001 до 0,02, а кај дебелослојните од 0,03 до 0,05.

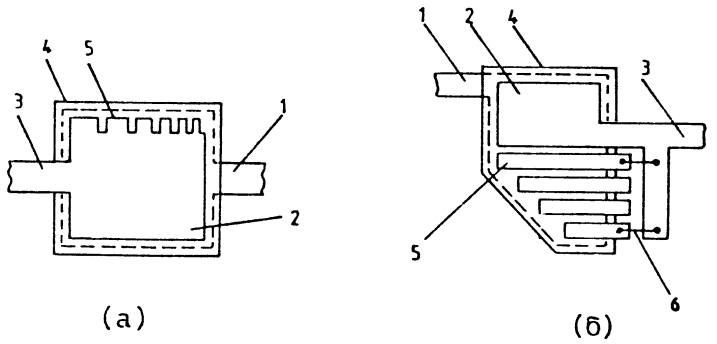
Капацитивноста на реализираниот кондензатор ќе се разликува од неговата номинална вредност поради грешките настанати во производството. Со оглед на тоа што во изразот за капацитивноста (5.3.22) на промена се подложни величините ε_r, d и S, настанатата релативна грешка ќе биде дадена со релацијата:

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{\Delta\varepsilon_r}{\varepsilon_r} - \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta S}{S} \qquad (5.3.26)$$

каде што $\Delta\varepsilon_r$ е грешка во проценатата на релативната диелектричка константа, Δd е отстапувањето на дебелината на диелектрикот во однос на

проектираната вредност и ΔS е отстапувањето на преклопната плоштина на електродите во однос на проектираната вредност.

Како што се гледа од табелите 5.3 и 5.4, факторот на дозволеното отстапување од номиналната вредност кај слојните кондензатори γ_C е релативно голем (10 до 20%). Затоа, доста често, се користи можноста за уточнување. Уточнувањето обично се врши преку намалување на преклопната плоштина на електродите по пат на отсечување дел од горната електрода со помош на ласерски зрак. За да се поедностави постапката и да се обезбедат попрецизни резултати, горната електрода (на кондензаторите предвидени за уточнување) се изведува така што на едната нејзина страна се остваваат заби за уточнување со различни плоштини (сл.5.10-а); со селективно отсекување на забите се постигнува гарантираната точност. Можно е уточнувањето на кондензаторите да се врши и по пат на вклучување дополнителни кондензаторски секции со помош на жички, како што е покажано на сликата 5.10-б. Се разбира, во случајот на сликата 5.10-а номиналната капацитивност на кондензаторот што треба да се коригира е нешто поголема од бараната капацитивност, а во случајот на сликата 5.10-б - нешто помала од бараната капацитивност.

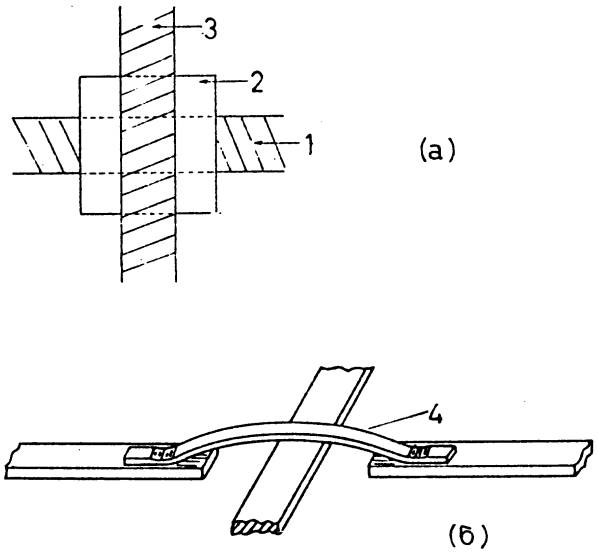


Сл.5.10. Уточнување на слојните кондензатори по пат на намалување на капацитивноста (а) и по пат на зголемување на капацитивноста (б)

1 - извод на долната електрода
2 - горна електрода
3 - извод на горната електрода
4 - диелектрик
5 - елемент за уточнување
6 - жичка

5.3.4. Вкрстувања кај слојните кола

Со зголемување на сложеноста на хибридните интегрални кола, се јавува потгеба од вкрстување на проводните патеки. Овие вкрстувања можат да се реализираат по пат на уфрлање изолационен филм меѓу двете проводни патеки (сл.5.11-а) или со помош на мала метална лента (обично златна), како што е прикажано на сликата 5.11-б. Кај дебелослојните кола повеќе се употребува првиот начин, а кај тенкослојните - вториот



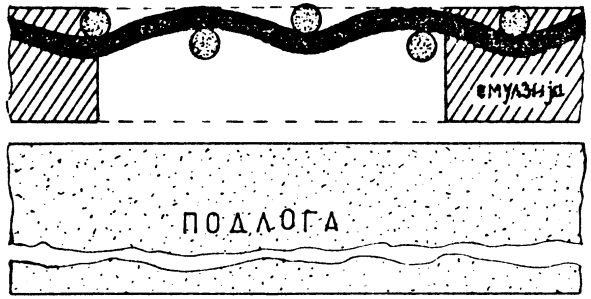
Сл.5.11. Вкрстување на проводни патеки

1-долна проводна патека
2-изолатор
3-горна проводна патека
4-метална лента

5.4. Нанесување филмови во дебелослојната техника [1,2,5,23]

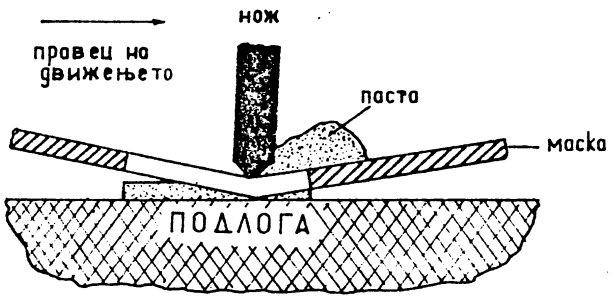
Во дебелослојната техника филмовите се реализираат според методот на сито-печат. Материјалите за нанесување се во облик на пасти и во принцип се состојат од три компоненти: функционален материјал, стакло (на пример, боросиликатно) и органски носител (на пример, алкохоли и терпентини). Составот на функционалниот материјал зависи од намената на филмот. Ако се работи за проводнички филм, функционалниот материјал е чист метал или легура. Во случајот на отпорнички филм, функционалниот материјал е, најчесто, некое полупроводничко соединение или легура со релативно голема специфична отпорност. И, конечно, кога треба да се реализира

изолаторски филм, како функционален материјал се користи соодветен диелектрик. Стаклото, што се додава во вид на стаклен прав, служи како средство за поврзување на честиците на функционалниот материјал и ја обезбедува атхезијата на филмот кон подлогата. Органскиот материјал ја обезбедува флуидноста на пастата и ѝ дава својства потребни за постапката на сито-печатење.



Сл.5.12. Маска за нанесување на пастите кај дебелослојните кола

Нанесувањето на пастите се врши преку специјални флексибилни маски кои се изведени од емулзиони фолии проткаени со челична мрежа (сл.5.12). Густината на челичната мрежа се движи до 40 до 156 жици/cm, зависно од бараната точност на печатењето. Притоа, факторот на пополнетост на мрежата изнесува 54 до 64%. Шарата на маската (т.е. распределбата и обликот на потребните отвори) се реализира по фотолитографски пат.

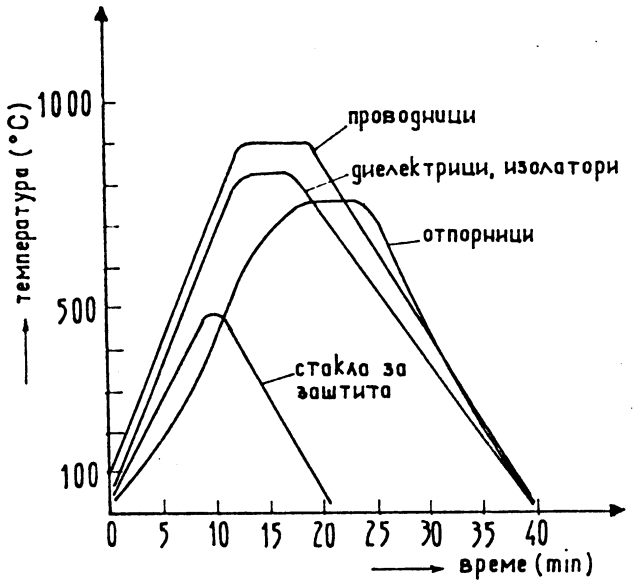


Сл.5.13. Приказ на методот на сито-печатење

Пастите се нанесуваат со помош на уред за сито-печатење. Овој уред го регулира поставувањето на маската во однос на подлогата и управува со движењето и положбата на специјален нож наменет за истискување на пастата низ отворите на маската (сл.5.13).

По печатењето, депонираниот материјал се суши на температура од 70 до 250^{o}C во траење од 15 до 30 минути. Со тоа всушност се отстранува органскиот носител, кој беше неопходен само за да ги обезбеди потребните својства на пастите за извршување на постапката на печатење. По сушењето, подлогата со депонираниот ма-

теријал се внесува во специјална печка која овозможува печење на филмот според одреден временско-температурен профил (сл.5.14). Целиот циклус на печењето обично трае околу 45 минути.



Сл.5.14. Временско-температурни профили на печењето на пастите

Во основа, секој температурен профил може да се подели на три подрачја: подрачје на загревање, подрачје на максимална температура и подрачје на ладење. Во подрачјето на загревање доаѓа до согорување на неиспарените состојки на органскиот носител и до растопување на стаклениот прав. Во подрачјето на максимална температура се одвива процесот на синтерирање, т.е. се создава саканата структура и особините на филмот. Во подрачјето на ладење престанува процесот на синтерирање, а кај диелектричките пасти со кристализационо стакло,како функционален материјал,доаѓа до кристализација на стаклото.

5.5. Основни материјали за формирање на дебелослојните кола [1-3,20,23]

5.5.1. Подлога

Основните особини со кои треба да се одликува подлогата кај дебелослојните кола се:

- голема механичка цврстина,
- добра топлинска проводност,
- голема специфична отпорност,
- физичка и хемиска компатибилност со нанесуваните филмови
- термостабилност, т.е. способност да ги издржи високите темепратури (до 1000°C) на печењето,
- задоволителна глаткост на површината,
- ниска цена.

Наведените особини се исполнети многу добро од страна на керамичките материјали базирани на алуминиумов триоксид (Al_2O_3), односно на берилиумов оксид (BeO). Во табелата 5.5. се дадени некои од релевантните својства на овие материјали.

Табела 5.5. Основни својства на керамичките подлоги

Својство	Димензија	96% Al_2O_3	99% BeO
Специфична маса	g/cm^3	3,70	2,88
Специфична топлинска проводност (25°C)	J/s cm K	0,25	2,38
Специфична отпорност 25°C 100°C 300°C	Ωcm	 $>10^{14}$ $2,0x10^{13}$ $1,1x10^{10}$	 $>10^{14}$ $>10^{14}$ $>10^{14}$
Диелектричка цврстина	kV/mm	8,3	8,7
Максимална дозволена температура	°C	1550	1500

Паѓа во очи фактот дека специфичната топлинска проводност на BeO е многу поголема од соодветната величина кај Al_2O_3. И покрај оваа значајна предност на BeO, во практиката многу повеќе се употребуваат подлоги од Al_2O_3. Тоа е резултат на значително пониската цена на Al_2O_3 и на токсичното дејство на BeO. На подлогите од BeO им се дава предност само во случаите кога се неизбежни големи дисипации на моќност по единица плоштина.

5.5.2. Проводнички пасти

Проводничките пасти се наменети за формирање проводни патеки, кондензаторски електроди и контактни површини. Типичните вредности на слојната отпорност на отпечатените проводнички филмови се движат од 0,001 Ω/□ до 0,1 Ω/□. Од проводничките пасти се бараат следниве основни особини:

- голема специфична проводност,
- добра атхезија кон подлогата,
- способност за бондирање (т.е. за формирање споеви),
- компатибилност со другите пасти применувани во процесот,
- ниска цена.

Како функционални материјали кај проводничките пасти се користат благородните метали, т.е. среброто (Ag), златото (Au), платината (Pt) и паладиумот (Pd), како и нивните легури: Pt-Au, Pt-Ag, Pd-Ag и Au-Pt-Pd.

5.5.3. Отпорнички пасти

Отпорничките пасти служат за реализација на дебелослојните отпорници. Денес на пазарот постојат комплети на отпорнички пасти со слојни отпорности во декадни вредности од 1 Ω/□ до 10 MΩ/□ (за филм со дебелина - пред печењето - од 25 μm).

Како најчесто употребувани функционални материјали кај отпорничките пасти се јавуваат рутениумдиоксидот (RuO_2) и комбинацијата паладиум-сребро (Pd-Ag). Температурниот коефициент на отпорноста (TCR) кај пастите[1/] врз база на RuO_2 се движи во границите

1/ Се мисли на температурниот коефициент на отпорноста на отпорниците изведени со тие пасти.

$\pm 50 \times 10^{-6} K^{-1}$, а кај пастите врз база на Pd-Ag - во границите $\pm 100 \times 10^{-6} K^{-1}$.

Слојната отпорност и коефициентот TCR кај отпорничките пасти зависат од процентуалната застапеност на функционалниот материјал. Со зголемување на учеството на функционалниот материјал во однос на стаклото се намалува слојната отпорност, а коефициентот TCR се стреми кон позитивни вредности.

5.5.4. Диелектрички пасти

Диелектричките пасти имаат повеќе намени во дебелослојната техника. Имено, тие ги вршат следниве функции:

- служат за реализација на диелектрикот кај слојните кондензатори,
- служат за реализација на изолаторот кај вкрстувањата меѓу две патеки,
- служат за заштита на елементите на слојното коло од надворешни влијанија.

Како функционален материјал кај диелектричките пасти се јавуваат разни видови керамички материјали. Стаклото, кое кај другите пасти служи како средство за поврзување на честиците на функционалниот материјал и за обезбедување добра атхезија на филмот кон подлогата, овде има истовремено и улога на функционален материјал, бидејќи и самото е диелектрик.

Според големината на диелектричката константа, диелектричките пасти можат да се поделат на две групи:

- диелектрички пасти со релативно мала диелектричка константа,
- диелектрички пасти со голема диелектричка константа.

Во првата група спаѓаат пастите чија релативна диелектричка константа е помала од 500, а во втората - пастите со релативна диелектричка константа поголема од 500.

Пастите со мала диелектричка константа се користат за реализација на изолаторот кај вкрстувањата меѓу две патеки и за реализација на кондензатори со мали капацитивности (C<200 pF).

Како основна компонента кај нив се јавуваат нефероелектричните керамички материјали, како на пример: магнезиумовиот титанат (ε_r=14), цинковиот титанат (ε_r=19) и калциумовиот титанат(ε_r=160). Овие пасти се одликуваат со мал фактор на диелектрички загуби, мал коефициент на стареење и слаба зависност на диелектричката константа од температурата.

Пастите со голема диелектричка константа (ε_r=500 до 10000) се применуваат за реализација на кондензатори. Како основна компонента кај нив обично се јавува фероелектричниот керамички материјал бариумов титанат($BaTiO_3$) со кој се постигнуваат капацитивни густини до 150 nF/cm^2. Овие пасти се одликуваат со поголем фактор на диелектричките загуби, поголем коефициент на стареењето и многу поголема зависност на диелектричката константа од температурата отколку што е случајот со пастите од првата група. Освен тоа, кај нив се забележува зависност на диелектричката константа од електричното поле во диелектрикот и од честотата на приклучениот сигнал.

За заштита на елементите на слојното коло од надворешни влијанија се користат диелетрички пасти кои не содржат керамичка компонента туку само стакло. Овие пасти спаѓаат во редот на пастите со мала диелектричка константа. Максималната температура на печењето на овие пасти не поминува 500^{o}C. Бидејќи оваа температура е за неколку стотици степени пониска од максималната температура на печење на отпорниците, поставувањето на заштитниот слој ќе нема практично никакво влијание врз вредностите на отпечатените отпорници кои се, повеќе од другите елементи, осетливи на дополнително печење.

Во последно време сè поголемо значење добиваат еден вид диелектрички пасти кои како функционален материјал користат т.н. кристализациони стакла. Кај овие пасти, по првото печење доаѓа до кристализација на стаклото. Тоа ги прави наполно неосетливи на секое наредно печење, што значи и погодни за поставување меѓу проводничките филмови. Се одликуваат со поголема диелектричка цврстина и поголема специфична отпорност од другите пасти и спаѓаат во редот на пастите со мала диелектричка константа. Особено се погодни за реализација на вкрстувања, односно на специјални повеќеслојни структури.

Диелектричката цврстина на филмовите од диелектрички пасти обично се движи од 4x10^4 до 2x10^{5}V/cm. Тоа значи дека за филмови со стандарна дебелина од 25 μm пробивните напони ќе се наоѓаат меѓу 100 и 500 V. Кај филмовите од кристализациони стакла диелектричката цврстина е поголема од 2x10^{5}V/cm.

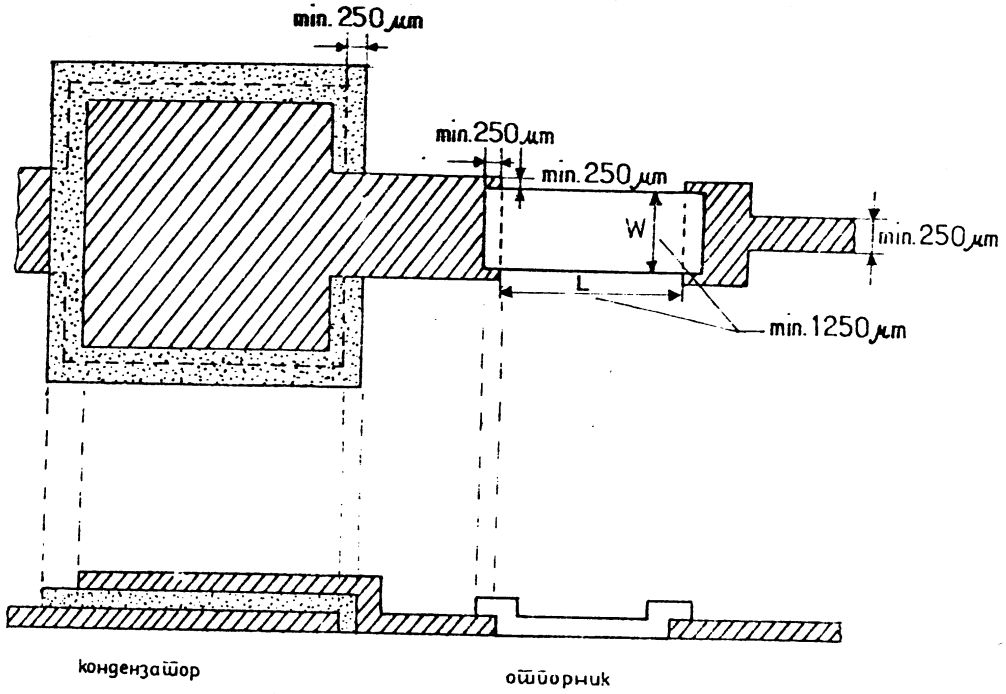
5.6. Фабрикациона секвенца кај дебелослојните кола[2,3,23]

При реализацијата на отпорничко-капацитивни мрежи во дебелослојната техника, обично се постапува според следнава фабрикациона секвенца:

(1) печатење и печење на проводничката шара што ги опфаќа долните електроди на кондензаторите и со нив поврзаните проводнички патеки и проводнички површини,
(2) печатење и печење на диелектричката шара за формирање на кондензаторите,
(3) печатење и печење на диелектричката шара за формирање на вкрстувањата,
(4) Печатење и печење на проводничката шара што ги опфаќа горните електроди на кондензаторите и со нив поврзаните проводнички патеки и површини,
(5) Печатење и печење на повеќе различни отпорнички шари со различни слојни отпорности (најчесто, бројот на отпорничките шари е ограничен на три).
(6) нанесување и печење заштитен (диелектрички) филм.

Диелектричките шари обично се печатат во два слоја. Со тоа се елиминира можноста од појава на пукнатини во нив, односно на кратки споеви меѓу соодветните проводнички филмови. Се разбира, доколку колото не содржи кондензатори односно вкрстувања, точките (2), (3) и (4) ќе отпаднат.

На сликата 5.15 се прикажани топологијата и пресекот на еден отпорничко–капацитивен член изведен во дебелослојната техника.



Сл.5.15. Топологија и пресек на RC-член во дебелослојната техника

5.7. Формирање филмови во тенкослојната техника [2,3,5,17]

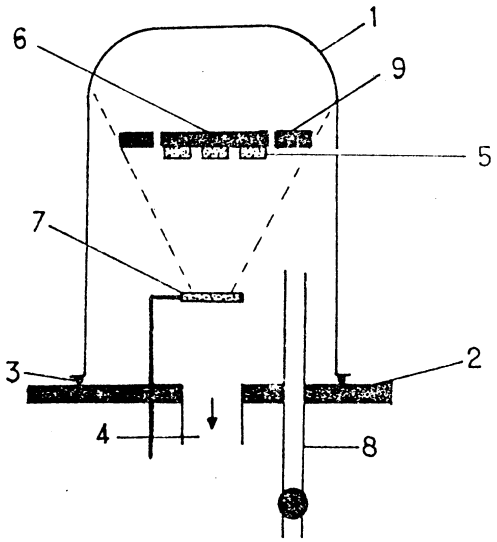
Во тенкослојната техника се користат три основни методи за формирање на филмовите: термичко (вакуумско) напарување, катодно распрашување и електрохемиско нанесување.

5.7.1. Термичко напарување

Овој метод е прикажан, во кратки црти, во главата 2, во врска со метализацијата во планарната технологија, па овде нема да биде посебно разгледуван. Негови основни карактеристики се едноставноста и можноста за добивање филмови со исклучително голема чистота. Како недостатоци можат да се наведат проблемите на кои се наидува при нанесувањето легури - кога е многу тешко да се остварат филмови со униформен состав - како и тешкотиите при нанесувањето на тешко топливи материјали.

5.7.2. Катодно распрашување

Шематскиот приказ на уредот со помош на кој се реализира катодното распрашување е даден на сликата 5.16. Ако се спореди овој уред со уредот за термичко напарување (сл.2.15), ќе се забележи совпаѓање во поголемиот број компоненти. Основната разлика се состои во тоа што испарувачот е заменет со катодата (7), која е составена од материјалот што треба да се нанесува или е во електричен контакт со таков материјал. Прстенестата електрода (9) врши функција на анода.



Сл.5.16. Шематски приказ на постапката на катодно распрашување

Постапката започнува со испумпување на воздухот под поклопката, до притисок од 10^{-3} до 10^{-4} Pa. Потоа низ цевката (8) се воведува одредено количество неутрален гас (најчесто аргон), додека притисокот не се подигне до 10 Pa. Катодата се приклучува на доволно висок негативен потенцијал (од 2000 до 3000 V) за во просторот меѓу неа и анодата - која е заземјена - да се јави абнормално тлеечко празнење, т.е. појава што е придружена со формирање електронско-јонска плазма. Абнормалното тлеечко празнење се карактеризира со силно електрично поле во просторот пред катодата. По-

зитивните јони, зафатени со ова поле, ја бомбардираат катодата со толку голема кинетичка енергија што од неа избиваат не само електрони (кои се неопходни за поддржување на празнењето) туку и неутрални атоми. Со тоа катодата постепено се троши, а дел од атомите избиени од неа се таложат на подлогите, формирајќи го на тој начин саканиот филм.

Значајна предност на катодното распрашување во споредба со термичкото напарување е тоа што распрашувањето не е поврзано со висока температура, т.е. точката на топење на даден материјал не игра никаква улога во неговото распрашување. Со самото тоа, нанесувањето на тешко топливи материјали, како и нанесувањето на легури и хемиски соединенија, не претставува проблем кај овој метод. Меѓутоа, методот на катодно распрашување има и недостатоци. Имено, бидејќи катодата овде треба да претставува елемент во електрично коло на абнормално тлеечко празнење, во кое сите елементи се сериски врзани, таа мора да има доволно голема специфична проводност . Ова барање го ограничува асортиманот на материјали што можат да се нанесуваат со овој метод. Така, на пример, нанесувањето на диелектрици е невозможно. Други недостатоци на катодното распрашување во споредба со термичкото напарување се: помала чистота на филмот (поради послабиот вакуум), помала брзина на нанесувањето и поголема сложеност во контролирањето на процесот.

Ограничувањата во поглед на асортиманот на материјалите што можат да се нанесуваат со помош на методот на катодно распрашување можат во значителна мера да се отстранат ако се користи една модификација на овој метод позната како реактивно катодно распрашување.

Реактивно катодно распрашување. Реактивното катодно распрашување се разликува од обичното катодно распрашување по тоа што кон основната маса на неутралниот гас се додава и мало количество на такви активни гасови кои се способни со распрашуваниот катоден материјал да ги создадат оние хемиски соединенија што треба да се нанесат на подлогата. На пример, со додавање кислород можно е да се добие филм од одреден оксид на катодниот материјал. Ако се додаде азот или јаглеродмоноксид, можно е да се добијат нитриди или карбиди на односниот распрашуван метал.

Инаку, механизмот на реактивното катодно распрашување сè уште е недоволно познат. Се верува дека при низок парцијален притисок на активниот гас хемиската реакција меѓу гасот и катодниот материјал се одвива главно на анодата, додека при повисоки притисоци реакцијата главно се случува на катодата (и тогаш на подлогите се нанесува веќе готово соединение).

5.7.3. Електрохемиско нанесување

Овој метод се користи главно за создавање на метални филмови, а се разликува од претходните по тоа што работната средина е течност.

Во основата на електрохемиското нанесување лежи електролизата на раствор кој содржи јони од металот што се нанесува. На пример, ако треба да се нанесува бакар се користи раствор од модар камен ($CuSO_4$), а ако треба да се нанесува злато или никел - раствори од соодветни соли на златото, односно никелот.

Во растворот, јоните на металите имаат позитивен полнеж (на пример, $CuSO_4 \rightarrow Cu^{++} + SO_4^{--}$). Затоа, при нанесувањето метален филм, подлогата се користи како катода. Анодата обично е изградена од металот што се нанесува, па нето-ефект на електролизата е всушност пренесување на анодниот материјал врз катодата (составот и концентрацијата на растворот остануваат непроменети). Ако подлогата претставува диелектрик, што е најчесто случај, на неа претходно се нанесува тенок метален потслој, кој всушност ќе служи како катода. Потслојот може да се нанесе по пат на термичко напарување или по пат на катодно распрашување.

Основна одлика на електрохемиското нанесување е големата брзина на процесот и едноставноста на неговото регулирање. Меѓутоа, квалитетот (структурата) и степенот на чистота на филмовите добиени на овој начин се полоши отколку кај претходните два метода.

5.7.4. Анодизација

Анодизацијата претставува електрохемиска оксидација на метална анода во електролитска келија со воден електролит. Се користи за формирање квалитетни оксидни филмови врз одредени метали, меѓу кои спаѓаат алуминиумот (Al), танталот (Ta), и титанот (Ti).

Анодизацијата може да биде опишана со следниве равенки:

$$kM + nH_2O \rightarrow M_kO_n + 2nH^+ + 2ne \quad \text{кај анодата}$$

$$2ne + 2nH_2O \rightarrow nH_2 + 2nOH^- \quad \text{кај катодата}$$

каде што M е ознака за атомот на металот на анодата, k и n го означуваат бројот на металните односно кислородните атоми потребни да се формира еден молекул на оксидот, а со e се означени електроните што се предаваат на анодата, односно што се добиваат од катодата. Нето-резултат на процесот е разложување на водата на кислород (кој се користи за оксидација на анодата) и водород (кој се ослободува на катодата).

5.8. Основни материјали за формирање на тенкослојните кола [1-3,8,19,20]

5.8.1. Подлога

Карактеристиките на тенкослојните кола во значителна мера зависат од својствата на подлогата. Во врска со тоа, во однос на подлогата се поставуваат практично истите барања како и кај дебелослојните кола. Некои од тие барања, меѓутоа, се построги, а некои помалку строги отколку кај дебелослојните кола. На пример, подлогите наменети за тенкослојните кола треба да бидат многу поглатки отколку подлогите наменети за дебелослојните кола. Од друга страна, додека подлогите на дебелослојните кола треба да бидат стабилни до многу високи температури (максималните температури на печење кај некои пасти достигнуваат 1000°C; тоа ја исклучува можноста на примена на стаклото како материјал за подлоги кај дебелослојните кола), од подлогите на тенкослојните кола не се бара толку висока температурна стабилност (температурата на која тие се изложени при термичкото напарување, односно катодното распрашување обично не преминува 400°C).

Подлогите на тенкослојните кола обично се реализираат од следниве материјали: керамика базирана на алуминиумов триоксид (99,5 до 99.94% Al_2O_3), керамика базирана на берилиумов оксид, разни видови стакла, силициум прекриен со термички нараснат слој од SiO_2 чија дебелина обично се движи од 0,6 до 1 μm. Понекогаш, како подлога се употребува и сафир.

Како и кај дебелослојните кола, и овде подлогите најчесто се реализираат од керамика базирана на алуминиумов триоксид. Основна предност на оваа керамика во споредба со берилиумовиот оксид е цената, а во споредба со стаклата - многу поголемата топлинска проводност. Во споредба со силициумот, алуминиумовиот триоксид се одликува со поголемата механичка цврстина. Глаткоста на површината не му е така добра како кај стаклата, меѓутоа овој недостаток може да се намали или елиминира по пат на полирање.

5.8.2. Проводнички филмови

Проводничките филмови се користат за формирање на проводнички патеки, кондензаторски електроди и проводни површини. Типичните вредности на слојната отпорност на проводничките филмови се движат од 0,01 до 0,1 Ω/□. Проводничките филмови обично се повеќеслојни, т.е. составени се од два до три метални слоја, бидејќи ниту еден од постојните метали не располага со сите потребни својства што се бараат од проводничките филмови. Имено, од проводничките филмови се бараат следниве својства:

- голема проводност,
- добра атхезија кон подлогата,
- отпорност кон корозија,
- добра лемливост, односно способност за бондирање,
- компатибилност со целокупниот процес на изработка на тенкослојното коло.

Добра атхезија кон подлогата се обезбедува со првиот слој. Метали што се употребуваат за таа цел се титанот (Ti) и хромот (Cr). Исто така се употребува и нихромот (никел-хромова легура со 80% Ni и 20% Cr).

Големата проводност се обезбедува со вториот слој. За таа цел обично се употребуваат бакарот (Cu), златото (Au), алуминиумот (Al) и паладиумот (Pd). (Среброто не се применува поради неговата особина да мигрира во присуство на електрично поле. Мигрирањето би претставувало потенцијален извор на прекини на спојните и напојните патеки). Во табелата 5.6. се дадени спе-

цифичните отпорности на овие метали и соодветните слојни отпорности за слоеви со дебелина од 0,1 μm.

Табела 5.6. Специфични отпорности и слојни отпорности на некои проводнички материјали

Метал	Специфична отпорност (Ω cm)	Слојна отпорност (Ω/□) (d=0,1 μm)
Cu	$1,7x10^{-6}$	0,20
Au	$2,4x10^{-6}$	0,27
Al	$2,8x10^{-6}$	0,33
Pd	$11,0x10^{-6}$	1,30

Бакарот се одликува со мала специфична отпорност, меѓутоа подложен е на оксидација и на други видови корозија. Затоа, кога се употребува како основен проводнички слој, мора да биде заштитен со слој од некој благороден метал, како, на пример, со слој од злато или паладиум. Златото и паладиумот, кога се употребуваат како основни слоеви, не бараат заштита, но затоа се значително поскапи од бакарот. Алуминиумот е, исто така, многу погоден за употреба како основен проводнички слој. Се одликува со мала специфична отпорност, лесно се нанесува и формира заштитен оксиден слој кој може истовремено да се користи и како диелектрик кај тенкослојните кондензатори. Освен тоа, тој е многу поевтин од златото и паладиумот.

Ако за спојување на чип-компонентите се користи техниката на термокомпресија, најпогоден проводнички материјал е златото. Ако спојувањето се врши по пат на лемење, тогаш паладиумот е подобар од златото. Алуминиумот не е компатибилен со вообичаената техника на термокомпресија односно на лемење, меѓутоа, погоден е за ултразвучно спојување.

5.8.3. Отпорнички филмови

Како основни материјали за реализација на тенкослојните отпорници се јавуваат танталовиот нитрид, нихромот и класата на материјали наречени кермети (керамички метали).

Танталовиот нитрид (Ta_2N) се одликува со извонредно добра временска стабилност. Дебелината на филмот може да варира од еден нанометар до повеќе стотици нанометри, што резултира во слојни отпорности од 2500 Ω/□ до 1 Ω/□. Во практиката, дебелината на филмот обично се наоѓа во опсегот од 10 до 50 nm, што соодветствува на слојни отпорности од 250 Ω/□ до 50 Ω/□. Температурниот коефициент на отпорноста е $-75x10^{-6}K^{-1}$.

Нихромот е, исто така, временски стабилен. Неговата специфична отпорност е нешто помала отколку специфичната отпорност на танталовиот нитрид, така што при варирањето на дебелината на филмот од 10 до 50 nm слојната отпорност варира од 150 Ω/□ до 30 Ω/□. Инаку, можни се слојни отпорности од 500 Ω/□ до 1Ω/□. Температурниот коефициент на отпорноста типично изнесува $30x10^{-6}K^{-1}$. Слаба страна на нихромот е неговата осетливост на влага, па му е потребен соодветен заштитен слој, обично од стакло или силициуммоноксид (SiO).

Керметите се механичка смеса која се состои, обично, од две компоненти: метал и диелектрик. Како диелектрици се употребуваат различни оксиди, бориди и нитриди, а како метали титанот, хромот, молибденот (Mo) и други. Специфичната отпорност на керметите може да се менува во широки граници (од 10^{-3} до 10^{2} Ω cm) со промена на процентуалното учество на диелектрикот во смесата. Најчесто се употребува комбинацијата хром-силициуммоноксид (Cr-SiO) со која обично се реализираат слојни отпорности од 10 до 400 Ω/□. Температурниот коефициент на отпорноста кај овој кермент се движи од $-100x10^{-6}$ до $100x10^{-6}K^{-1}$, зависно од процентуалното учество на составните компоненти. Керметските отпорници покажуваат голема временска и температурна стабилност и се неосетливи на влага.

5.8.4. Диелектрички материјали[4]

Основната намена на диелектричките материјали е реализација на кондензаторските диелектрици. Од овие материјали се бараат следниве особини:

- голема диелектричка константа,
- голема диелектричка цврстина,

- мали диелектрички загуби,
- голема временско-температурна стабилност на карактеристиките,
- голема специфична отпорност.

Во тенкослојната техника се употребуваат поголем број диелектрички материјали од кои како позначајни во современата примена се јавуваат силициуммоноксидот, силициумдиоксидот, германиуммоноксидот (GeO), алуминиумтриоксидот (Al_2O_3) и танталпентоксидот (Ta_2O_5). Нивните основни карактеристики (релативната диелектричка константа, диелектричката цврстина и факторот на диелектричките загуби) се прикажани во табелата 5.7. Од табелата се гледа дека диелектричките константи на овие материјали се релативно мали во споредба со диелектричките константи на некои материјали во дебелослојната техника. Тоа, меѓутоа, целосно се компензира со мала дебелина на филмот (до околу 0,05 μm). Така, на пример, кај тенкослојните кондензатори врз база на Al_2O_3 се постигнуваат специфични капацитивности поголеми од 40 nF/cm^2, а кај оние врз база на Ta_2O_5 - поголеми од 150 nF/cm^2.

Табела 5.7. Основни карактеристики на тенкослојните диелектрици (приближни вредности)

Материјал	ε_r	$E_{(BR)}, 10^6 V/cm$	tgδ'
SiO	6	2	0,005-0,010
SiO_2	4	5-10	0,020-0,050
GeO	11-12	1	0,001-0,005
Al_2O_3	9	5	0,010
Ta_2O_5	20÷25	2	0,003

Танталовиот пентоксид и алуминиумовиот триоксид се добиваат обично по пат на анодизација. Затоа овие диелектрици се користат тогаш кога долната електрода на кондензаторот е тантал, односно алуминиум. Кондензаторите добиени на ваков начин се поларизациони. Имено, долната електрода кај нив мора да биде на повисок потенцијал од горната.

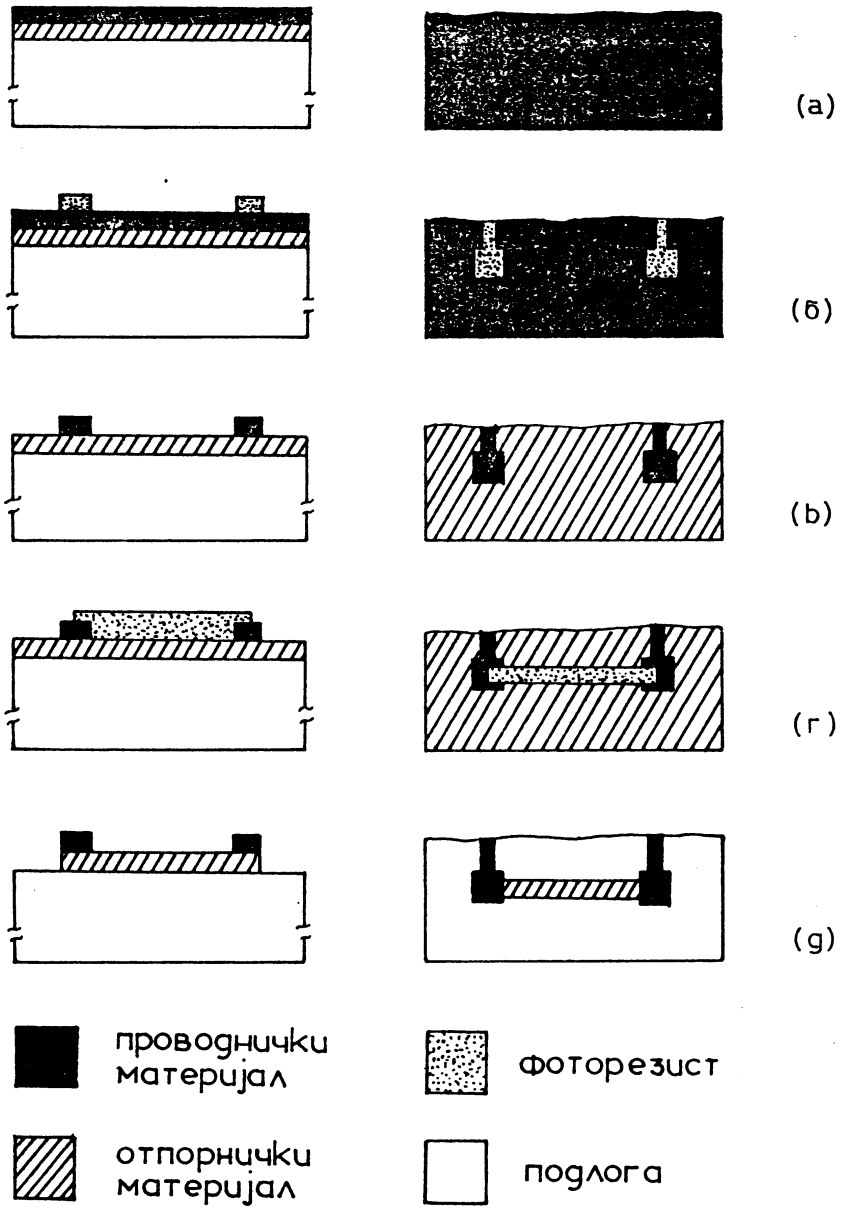
Треба да се истакне дека при реализацијата на тенкослојните кола изборот на проводничките, отпорничките и диелектричките материјали не е независен. Тој е обично одреден со изборот на отпорничкиот материјал. Така, на пример, за Ta_2N (како отпорнички материјал) компатибилен проводнички материјал е златото - а диелектрик Ta_2O_5, додека за Ni-Cr компатибилен проводнички материјал е златото или алуминиумот - а диелектрик SiO, односно Al_2O_3.

5.9. Изготвување на тенкослојните кола [2,3]

Во тенкослојната техника се применуваат две принципиелно различни постапки за дефинирање на шарите на нанесените филмови. Тоа се постапката на селективна депозиција и суптрактивната постапка. Кај постапката на селективна депозиција, шарата се дефинира при депонирањето на филмот, со помош на соодветна маска. Кај суптрактивната постапка, шарата се дефинира по депонирањето на филмот, т.е. по фотолитографски пат. Јасно, суптрактивната постапка е попрецизна и според тоа дава поголеми можности во поглед на минијатуризацијата на тенкослојните кола отколку постапката на селективна депозиција.

Во почетниот период од развојот на тенкослојната техника, главно се користеше постапката на селективна депозиција. Денес, меѓутоа, ситуацијата е обратна. Имено, кај современите тенкослојни кола, шарите на практично сите слоеви се дефинираат со суптрактивната постапка, т.е. суптрактивната постапка доминира. Сепак, постапката на селективна депозиција е сè уште значајна бидејќи во практиката се јавуваат и случаи кога не е можно оваа постапка да ја супституираме со суптрактивната постапка.

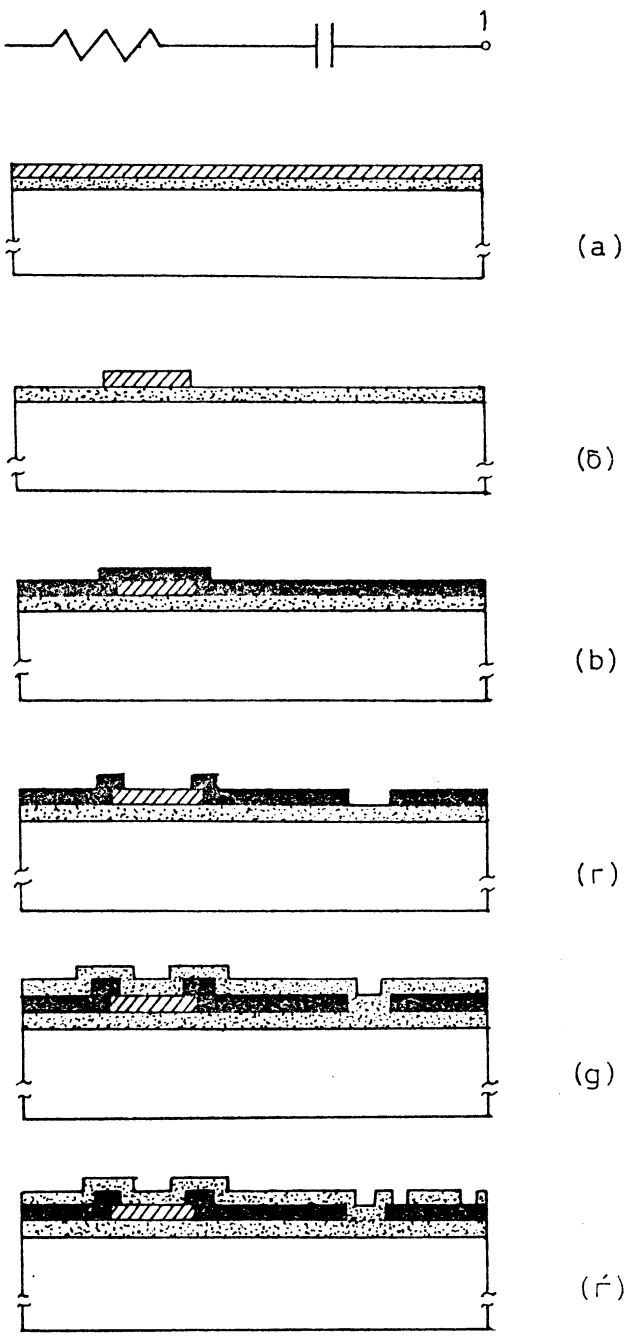
На сликата 5.17. е прикажан еден начин на реализација на тенкослојно коло составено од проводнички и отпорнички елементи. Овој начин може да се примени, на пример, кога како отпорнички материјал се користи нихромот, а како проводнички златото. Шарите се дефинираат со помош на суптрактивната постапка. Најнапред, по пат на термичко напарување или катодно распрашување, на

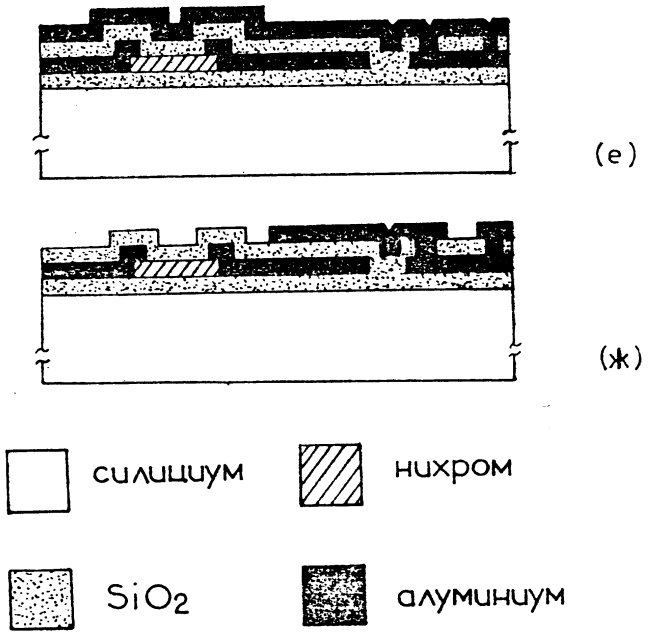


Сл.5.17. Реализирање тенкослојно коло составено од проводнички и отпорнички елементи

подлогата се нанесува отпорнички слој, а потоа и проводнички (сл.5.17-а). Следува реализација на фоторезистна маска врз проводничкиот слој (сл.5.17-б). Следен чекор е хемиско нагризување на проводничкиот слој и отстранување на фоторезистот - со што се добива проводничката шара (сл.5.17-в). По пат на фотолитографска постапка се реализира нова фоторезистна маска (5.17-г). Конечно, применувајќи хемиско нагризување на отпорничкиот слој, а потоа отстранувајќи го фоторезистот, се добива отпорничката шара (сл.5.17-д). Со тоа колото е реализирано. Треба да се има предвид дека средството со кое се врши нагризување на проводничкиот слој не смее да го нагризува отпорничкиот слој и обратно, т.е. средството со кое се нагризува отпорничкиот слој треба да биде пасивно во однос на проводничкиот слој.

Постојат голем број различни методи за изготвување на отпорничко-капацитивни кола. Заеднички именител им е релативно големата сложеност во споредба со изготвувањето кола без кондензатори. На сликата 5.18 е прикажан, во кратки црти, еден од поедноставните такви методи. Како илустрација е земена реализацијата на еден RC-член чиј еден крај завршува со контактна површина. Овој метод се применува во случај на силициумска подлога со термички нараснат слој од силициумдиоксид. И овде шарите се дефинираат по фотолитографски пат. Најнапред се нанесува слој од нихром (сл.5.18-а) и по фотолитографски пат се реализира отпорничката шара (сл.5.18-б). Следни чекори се нанесување слој од алуминиум (сл.5.18-в) и фотолитографско реализирање на проводните патеки и долните облоги на кондензаторите (сл.5.18-г). Следува нанесување на силициумдиоксид (по пат на хемиско напарување или реактивно катодно распрашување) по целата површина на плочата (сл.5.18-д). Овој слој ќе служи како кондензаторски диелектрик и како заштита на нихромот од влага. По фотолитографски пат, на соодветни места во диелектрикот се прават отвори преку кои ќе бидат споени горните електроди на кондензаторите и контактните површини со соодветните проводни патеки (сл.5.18-ѓ), а потоа по целата површина на плочката се нанесува слој од алуминиум (сл. 5.18-е). Конечно, се применува уште една фотолитографска постапка за да се реализираат горните електроди на кондензаторите и контактните површини (сл.5.18-ж). Со тоа процесот е завршен.





Сл.5.18. Реализирање тенкослојно RC-коло
1-контактна површина

Важно е да се забележи дека во тенкослојната техника, за разлика од дебелослојната, се користи само една шара (еден филм) за реализација на слојните отпорници. Според тоа, сите реализирани отпорници на дадено тенкослојно коло се карактеризираат со иста номинална слојна отпорност.

5.10. Чип-компоненти[1-3,2,7,11,15]

Самостојната примена на слојните кола (т.е. без користење на компоненти од други технологии) е ограничена само на извршување мал број функции, т.е. на оние функции за кои не се потребни

активни елементи, индуктивни елементи, како и кондензатори со поголеми капацитивности. Според тоа, добрите страни на слојната техника можат да дојдат до целосен израз само во рамките на хибридните интегрални кола, каде што најголемиот дел од пасивните елементи се реализираат на заедничка подлога во вид на дебелослојно или тенкослојно коло, а потребните активни елементи и другите пасивни елементи - што не можат економично да се изработат во слојната техника - се додаваат како чип-компоненти. И кај тенкослојните и кај дебелослојните хибридни интегрални кола, во улога на активни чип-компоненти се јавуваат разни видови диоди, разни видови транзистори и цели монолитни интегрални кола, а во улога на пасивни чип-компоненти - кондензатори и индуктивни елементи, а понекогаш и отпорници.

5.10.1. Активни чип-компоненти

Активните чип-компоненти се произведуваат главно со примена на планарната технологија. Според изведбата и начинот на приклучувањето (т.е прицврстувањето за подлогата и спојувањето во колото), активните чип-компоненти можат да се поделат на следните три групи:

- чип-компоненти без изводи,
- чип-компоненти со флексибилни изводи,
- чип-компоненти со крути изводи.

Чип-компонентите без изводи претставуваат всушност обични чипови, без каква и да било дополнителна обработка. Се монтираат така што најнапред се прилепуваат на соодветно место на подлогата, а потоа нивните контактни површини се спојуваат со соодветните контактни површини на подлогата. Прилепувањето може да се изврши по евтектички пат (меѓу чипот и подлогата се става мал тенок лист од легура на злато и силициум која се топи при температура од 370^{o}C и која по ладењето остварува цврста врска меѓу чипот и подлогата) или со помош на лепило врз база на епоксидна смола. За спојување на контактните површини на чипот со соодветните контактни површини на подлогата се користат тенки жички од злато или алуминиум. Пречникот на жичките се движи од 25 до 100 μm. Самото спојување (бондирањето) се врши по пат на

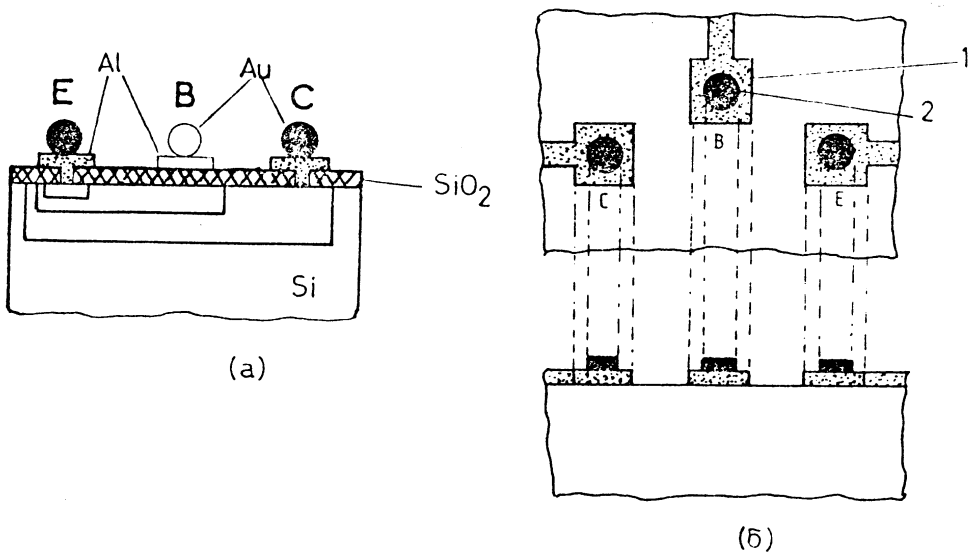
термокомпресија, по пат на лемење или со помош на ултразвучна енергија. Бидејќи чип-компонентите без изводи немаат сопствена заштита од надворешната средина (постојниот површински слој од силициумдиоксид не обезбедува доволна заштита), неопходно е, по монтирањето на хибридното коло, сите чип-компоненти поодделно да се заштитат со епоксидна смола или пак целото хибридно коло да се стави во херметички затворено куќиште. Чип-компонентите без изводи се користат главно од оние производители на хибридни интегрални кола кои сами си ги произведуваат потребните чипови.

Чип-компонентите со флексибилни изводи се разликуваат од чип-компонентите без изводи по тоа што се јавуваат на пазарот како финални производи, со веќе монтирани тенки жички. Кај нив, горната површина на кристалот е прекриена со релативно дебел слој од заштитна смеса која го заштитува чипот од надворешни влијанија и ги прицврстува,механички,монтираните изводи.

Чип-компонентите со крути изводи се специјално оформени компоненти кои се приспособени за истовремено спојување на сите нивни изводи со, исто така, специјално изготвените за таа цел контактни површини на подлогата. Освен електричното поврзување, крутите изводи го обезбедуваат и механичкото прицврстување на компонентата за подлогата. Според обликот на изводите, можат да се разликуваат два основни типа чип-компоненти со крути изводи, т.е. чип-компоненти со топчести изводи и чип-компоненти со гредообразни изводи.

На сликата 5.19-а е прикажан обликот на чип-компонента (транзистор) со топчести изводи. Топчињата најчесто се реализираат од злато, бакар или од легура на калај и антимон (Sn-Sb). Нивниот дијаметар обично се движи од 50 до 100 μm. Реализацијата на самите топчиња не претставува посебен проблем, Именс, метал растопен во мала количина,сам од себе - под дејство на површинските молекуларни сили, добива облик на топка. За да се овозможи приклучување на чип-компонентата, врз контактните површини на подлогата се изведуваат столпчиња од истиот материјал од кој се изработени топчињата. Висината на столпчињата се движи од 10 до 15 μm, а дијаметарот - од 100 до 200 μm(сл.5.19-б). При-

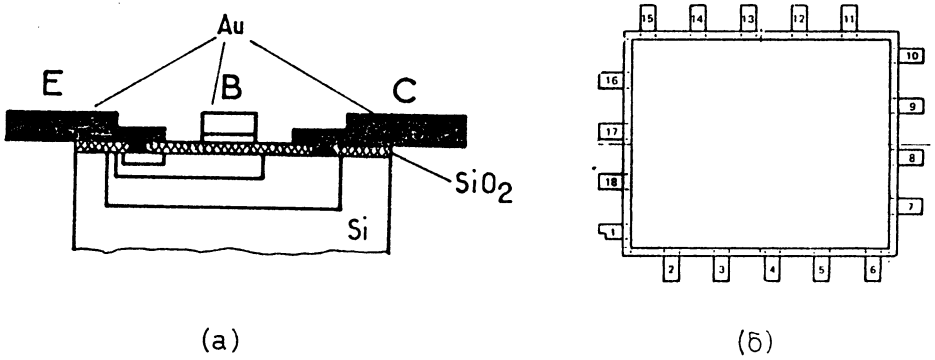
клучувањето се врши на тој начин што операторот најнапред ја превртува компонентата со лицето надолу и ја поставува така што положбите на топчињата да се совпаѓаат со положбите на соодветните столпчиња; потоа врши врз неа притисок при зголемена температура (термокомпресија), со што се постигнува истовремено спојување на сите изводи. Основната тешкотија што овде се јавува е прецизното поставување на чип-компонентата, бидејќи самата чип-компонента ги закрива од операторот местата на спојување. Чип-компонентите со топчести изводи обично се обезбедени од надворешни влијанија со посебен заштитен слој. Заштитниот слој во целост го прекрива слојот од силициумдиоксид и најчесто се состои од одреден вид стакло.



Сл.5.19. Чип-компонента со топчести изводи (а) и контактни површини на подлогата (б)
1- контактна површина; 2-столпче

На сликата 5.20 е прикажан обликот на чип-компонентите со гредообразни изводи. Гредичките се изработуваат од злато, а типичната големина на нивниот издаден дел е 125x50x10 μm^3. Како и компонентите со топчести изводи, и овие компоненти обично се

обезбедени со заштитен слој против надворешни влијанија. Заштитата најчесто се постигнува со помош на тенок слој од силициумнитрид врз слојот од силициумдиоксид.



Сл.5.20. Чип-компоненти со гредообразни изводи
а) транзистор
б) монолитно коло со 18 изводи, свртено со лицето надолу

Начинот на приклучување на овие компоненти е сличен со начинот на приклучување на чип-компонентите со топчести изводи. Меѓутоа, со оглед на издадеността на гредичките, изведувањето на самата постапка е многу поедноставно отколку кај чип-компонентите со топчести изводи. Освен тоа, овде постои можност на визуелна контрола на квалитетот на остварените споеви, што не важи за чип-компонентите со топчести изводи. Чип-компонентите со гредообразни изводи зафаќаат релативно голема плоштина од подлогата (поголема отколку компонентите со топчести изводи), па не се најдобар избор кога треба да се постигне голема густина на пакување.

Изготвувањето на чипови со крути изводи е сложено и скапо. Сепак, во многу случаи тоа се исплатува бидејќи, општо земено, обезбедува значително поедноставување и поевтинување на операциите на монтирање и поврзување (најскапите операции во технолошкиот циклус), како и значително зголемување на приносот и надежноста на хибридните интегрални кола.

Како илустрација на сложеноста на изготвувањето чип-компоненти со крути изводи, ќе ги наведеме (по нормалниот редослед и без поголеми коментари) основните постапки кои го сочинуваат типичниот процес на изработка на биполарни чип-компоненти со гредообразни изводи (сл.5.21). Процесот започнува веднаш по завршувањето на емитерската дифузија и се одвива како што е дадено подолу.

(1) Се врши термичка оксидација со која се затвораат сите отвори во оксидната маска;

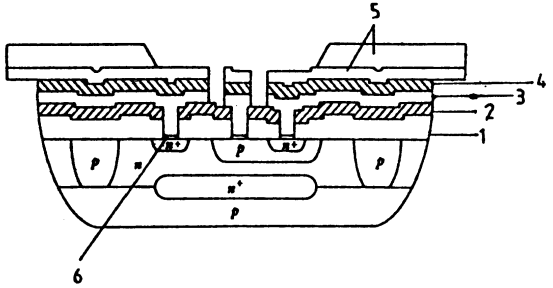
(2) Преку целата површина на плочката се нанесува, по пат на хемиско напарување, слој од силициумнитрид. Дебелината на овој слој, кој ќе игра улога на заштитен слој на чип-компонентата, изнесува 0,3 μm;

(3) Врз слојот од силициумнитрид се нанесува, по пат на хемиско напарување, нов слој од силициумдиоксид. Потоа, по фотолитографски пат, се реализираат контактните отвори. Следува отстранувањето на горниот слој од силициумдиоксид - чија задача беше само да послужи како маска за нагризување на слојот од силициумнитрид. Имено, хемикалиите што можат да се користат за нагризување на силициумнитрид не се компатибилни со фоторезистот;

(4) Плочката се прекрива со тенок слој од платина (0,05 μm) и се загрева на температура од 600°C во атмосфера на инертен гас. Како резултат на ова, на површината на силициумот - во контактните отвори - се создава слој од силицид на платина (Pt_5Si_2) кој обезбедува омски контакт со силициумот. Преостанатиот дел од платината (надвор од отворите) се отстранува;

(5) Врз целата површина на плочката се нанесува тенок слој од титан (0,05 μm), а потоа слој од платина (0,15 μm). Задача на слојот од титан е да обезбеди добра атхезија меѓу подлогата и металзационата мрежа - која ќе биде формирана од злато. Задача на слојот од платина е да ја спречи пенетрацијата на атоми од злато во силициумот затоа што тоа може значително

да влијае врз однесувањето на полупроводничките елементи;



Сл.5.21. Типичен пресек на чип-компонента со гредообразни изводи
1-SiO_2; 2-Si_3N_4; 3-Ti; 4-Pt; 5-Au; 6-Pt_5Si_2

(6) По фотолитографски пат се дефинира металзационата шара и се отстранува слојот од платина од оние места што се наоѓаат надвор од дефинираното подрачје. Слојот од титан се остава бидејќи во следниот чекор ќе биде користен како еквипотенцијална површина за селекитвно нанесување на злато врз подрачјата покриени со платина;

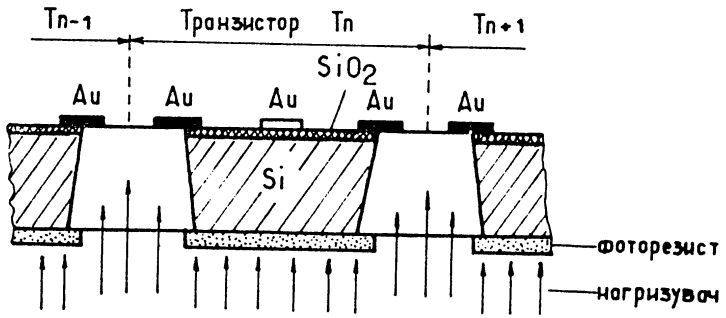
(7) По фотолитографски пат, користејќи фотошаблон кој е практично идентичен со фотошаблонот од претходниот чекор, се поставува фоторезист на оние делови од површината на плочката што не треба да бидат покриени со злато, а потоа се врши електрохемиско нанесување на злато. Со нанесувањето се престанува кога дебелината на нанесениот слој ќе достигне вредност од 2 μm. Со тоа е реализирана металзационата мрежа на чипот;

(8) Се поставува нова фоторезистна маска која има отвори само на оние места од металзационата мрежа на кои треба да бидат формирани изводите на чиповите, т.е. гредичките, а потоа се продолжува со електрохемиското нанесување на злато додека дебелината на гредичките стане еднаква на 12 μm;

(9) Се отстранува фоторезистот, а потоа и титанот, при што како маска за нагризување на титанот служи металзационата мрежа;

(10) Плочката се поставува на рамна стаклена подлога, со лицето надолу, и се бруси сè додека нејзината дебелина не се намали (од околу 200 μm) на 50 μm. Ова се прави за да се олесни извршувањето на наредниот чекор;

(11) Врз задната страна на плочката се формира соодветна фоторезистна маска - со отвори поставени како на сликата 5.22 - и се врши целосно нагризување на силициумот. Со тоа се постигнуваат две работи истовремено: се врши распарчување на плочката во чипови и се отстранува силициумот од под гредичките, т.е. се добиваат чип-компоненти со гредообразни изводи.

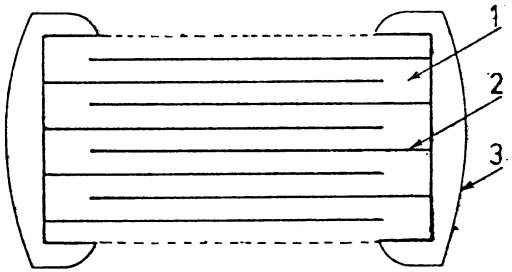


Сл.5.22. Распарчување на силициумската плочка во чип-компоненти со гредообразни изводи

5.10.2. Пасивни чип-компоненти

Од пасивните чип-компоненти најмногу се употребуваат кондензаторите. Чип-кондензаторите се обично керамички или танталови. Капацитивностите на керамичките чип-кондензатори најчесто се движат од 100 pF до 1 μF, а на танталовите од 10 nF до 100 μF. Како типичен чип-кондензатор се јавува керамичкиот кондензатор со метализирани краеви (сл.5.23). Метализираните краеви играат улога на крути

изводи, т.е. овозможуваат истовремено електрично спојување и механичко прицврстување на чип-компонентата.



Сл.5.23. Керамички кондензатор со метализирани краеви
1-диелектрик; 2-електрода; 3-метализиран крај

Индуктивните чип-компоненти се изведуваат со помош на минијатурни тороидални јадра. Нивните номинални вредности се движат од 0,1 до 100 μH. Обично,се приклучуваат со помош на тенки жички (од злато или алуминиум), а се прицврстуваат со епоксидна смола.

Понекогаш, кога тоа го поедноставува производството, можат и одредени отпорници да се додаваат како чип-компоненти. Номиналните вредности на чип-отпорниците обично се движат од 10 Ω до 15 MΩ. Чип-отпорниците најчесто се изведуваат врз мала керамичка подлога со помош на тенкослојната или дебелослојната техника. Се среќаваат различни начини на приклучување, зависно од оформувањето на чип-компонентата. Постојат, на пример, чип-отпорници со гредообразни изводи.

Прилог I

НЕКОИ СВОЈСТВА НА ФУНКЦИИТЕ erf(z) и erfc(z)

$$\mathrm{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-x^2} dx$$

$$\mathrm{erfc}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_z^\infty e^{-x^2} dx$$

$$\mathrm{erfc}(z) = 1 - \mathrm{erf}(z)$$

$$\mathrm{erf}(0) = 0, \quad \mathrm{erf}(\infty) = 1$$

$$\mathrm{erf}(z) \doteq \frac{2}{\sqrt{\pi}} z, \quad \text{при} \quad z \ll 1$$

$$\mathrm{erfc}(z) \doteq \frac{e^{-z^2}}{\sqrt{\pi}\, z}, \quad \text{при} \quad z \gg 1$$

$$\frac{d\,\mathrm{erf}(z)}{dz} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-z^2}$$

$$\int_0^z \mathrm{erfc}(x)\,dx = z\,\mathrm{erfc}(z) + \frac{1}{\sqrt{\pi}}(1 - e^{-z^2})$$

$$\int_0^\infty \mathrm{erfc}(x)\,dx = \frac{1}{\sqrt{\pi}}$$

Прилог II

ТАБЛИЦА НА ВРЕДНОСТИ НА ФУНКЦИЈАТА erfc(z)

z	erfc(z)	z	erfc(z)
0,00	1,00000	2,00	0,00468
0,10	0,88754	2,10	0,00298
0,20	0,77730	2,20	0,00186
0,30	0,67137	2,30	0,00114
0,40	0,57161	2,40	0,000689
0,50	0,47950	2,50	0,000407
0,60	0,39614	2,60	0,000236
0,70	0,32220	2,70	0,000134
0,80	0,25790	2,80	0,000075
0,90	0,20309	2,90	0,000041
1,00	0,15730	3,00	0,000022
1,10	0,11980	3,10	0,00001165
1,20	0,08969	3,20	0,00000603
1,30	0,06599	3,30	0,00000306
1,40	0,04772	3,40	0,00000152
1,50	0,03390	3,50	0,000000743
1,60	0,02365	3,60	0,000000356
1,70	0,01621	3,70	0,000000167
1,80	0,01091	3,80	0,000000072
1,90	0,00721	3,90	0,000000035

Прилог III

НЕКОИ СВОЈСТВА НА СИЛИЦИУМОТ

Атомски број	14
Атомска маса	28,6
Атомска густина	$5,02 \times 10^{22} cm^{-3}$
Густина	$2,33 g\ cm^{-3}$
Конфигурација на атомските нивоа	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$
Точка на топењето	$1412^{o}C$
Ширина на забранетата енергетска зона (E_G)	1,12 eV
Константа на афинитетот (χ)	4,35 V
Интринсична концентрација (n_i) 1/	$1,5 \times 10^{10} cm^{-3}$
Подвижност на електроните (μ_n) 1/	$1350\ cm^2 V^{-1} s^{-1}$
Подвижност на празнините (μ_p) 1/	$480\ cm^2 V^{-1} s^{-1}$
Релативна диелектирчна константа	11,8
Критично (пробивно) поле	$4 \times 10^5 V\ cm^{-1}$
Релативна диелектричка константа на SiO_2	3,82

1/ При температура од 300 К.

Прилог IV

ФИЗИЧКИ КОНСТАНТИ ШТО СЕ КОРИСТАТ ВО МИКРОЕЛЕКТРОНИКАТА

Полнеж на електронот	$q = 1,602 \times 10^{-19} C$
Планкова константа	$h = 6,626 \times 10^{-34} J s$
Болцманова константа	$k = 1,381 \times 10^{-23} J/K$
Диелектричка пропустливост на вакуумот	$\varepsilon_o = 8,854 \times 10^{-12} F/m$
Магнетна пропустливост на вакуумот	$\mu_o = 4 \times 10^{-7} H/m$
Брзина на светлината во вакуумот	$c = 2,998 \times 10^8 m/s$
Маса на слободниот електрон	$m = 9,110 \times 10^{-31} kg$
Авогардов број	$A_o = 6,022 \times 10^{23} mol^{-1}$
Бранова должина на видливото зрачење во вакуумот	$\lambda = 0,4\text{-}0,7\ \mu m$

Список на литература

1. Biljanović P.: "Mikroelektronika", Školska knjiga, Zagreb, 1983.
2. Степаненко П.И.: "Основы микроэлектроники", Советское радио, Москва, 1980.
3. Glaser B.A., Subak-Sharpe G.E.: "Integrated circuit engineering", Addison-Wesley, 1979.
4. Hamilton D.J., Howard W.G.: "Basic integrated circuit engineering", Mc Graw-Hill, 1975.
5. Colclaser R.A.: "Microelectronics", John Wiley & Sons,1980.
6. Ефимов Е.И., Горбунов И.Ю., Козыр Я.И.: "Микроэлектроника", Высшая школа, 1978.
7. Engene R.H.: "A user's handbook of integrated circuits", John Wiley & Sons, 1973.
8. Овечкин А.Ю.: "Микроэлектроника", Радио и Связь, 1982.
9. Атанасов С.А.: "Основи на микроелектрониката", Техника, София, 1979.
10. Millman J., Halkias C.: "Integrated electronics", Mc Graw-Hill, 1972.
11. Roddy D.: "Introduction to microelectronics", Pergamon press, Toronto, 1978.
12. Marjanović S.: "Elektronika - diskretna i integrisana analogna kola", Naučna knjiga, Beograd, 1981.
13. Stern L.: "Fundamentals of integrated circuits", Hayden, 1968.
14. Navon D.H.: "Electronic materials and devices", Houghton Mifflin, 1975.
15. Streetman B.G.: "Solid state electronic devices", Prentice-Hall, 1972.
16. Бондарь Г.Б., Письменецкий А.В., Хорунжий А.В.: "Микроэлектроника", Вища школа, 1981.
17. Brodie I. and Muray J.: "The physics of microfabrication", Plenum press, New York, 1982.
18. Штернов А.А.: "Физические основы конструирования, технологии РЭА и микроэлектроники", Радио и связь, 1981.
19. Курносов А.И.: "Материалы для полупроводниковых приборов и интегральных микросхем", Высшая школа, Москва, 1980.
20. Коледов Л.А., Волков В.А., Докучаев Н.И. и др.: "Конструирование и технология микросхем", Высшая школа, Москва,1984.

21. Пономарев Ф.М.: "Конструкции и расчет микросхем и микроэлементов ЭВА", Радио и Связь, 1982.
22. Матсон А.Э., Крыжановский В.Д., Петкевич И.В.: "Конструкции и расчет микросхем и микроэлементов ЭВА", Вышэйшая школа, Минск,1979.
23. Rikoski A.R.: "Hybrid microelectronic circuits - the thick film", John Wiley & Sons, 1973.
24. Sze S.M.: "Physics of semiconductor devices", John Wiley & Sons, 1969.

CIP-Каталогизација во публикација, Народна и универзитетска библиотека "Климент Охридски", Скопје

621.38.049.77(075.8)

ЦЕКОВ, Томислав
Микроелектроника: скрипта / Томислав Цеков. - Скопје: Универзитет "Кирил и Методиј", 1986. - VIII, 235 стр.: илустр. 24 см.

Библиографија: стр.234-235.